



SPECIAL ARTICLE

La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina I: introducción antecedentes a la IA y robótica



J.F. Avila-Tomás^{a,b,e,*}, M.A. Mayer-Pujadas^{c,e} y V.J. Quesada-Varela^{d,e}

^a Medicina de Familia y Comunitaria, Centro de Salud Santa Isabel, DASur, Madrid, España

^b Medicina Preventiva y Salud Pública, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, Madrid, España

^c Medicina de Familia y Comunitaria, Research Programme on Biomedical Informatics (GRIB), Instituto Hospital del Mar de Investigaciones Médicas y Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, España

^d Medicina de Familia y Comunitaria, Centro de Salud A Guarda. EOXI Vigo, A Guarda, Pontevedra, España

^e Miembro del Grupo de Trabajo de Innovación Tecnológica y Sistemas de Información de la semFYC

Disponible en Internet el 11 de julio de 2020

PALABRAS CLAVE

Inteligencia artificial;
IA;
medicina;
salud;
robótica;
BigData

Resumen La tecnología y la medicina siguen un camino paralelo durante las últimas décadas. Los avances tecnológicos van modificando el concepto de salud y las necesidades sanitarias están influyendo en el desarrollo de la tecnología.

La inteligencia artificial (IA) está formada por una serie de algoritmos lógicos suficientemente entrenados a partir de los cuales las máquinas son capaces de tomar decisiones para casos concretos a partir de normas generales.

Esta tecnología tiene aplicaciones en el diagnóstico y seguimiento de pacientes con una evaluación pronóstica individualizada de los mismos.

Además, si combinamos esta tecnología con la robótica, podemos crear máquinas inteligentes que hagan propuestas diagnósticas o que sean mucho más eficientes en su trabajo.

Por lo tanto la IA va a ser una tecnología presente en nuestro trabajo cotidiano a través de máquinas o programas informáticos, que de manera más o menos transparente para el usuario, van a ir siendo una realidad cotidiana en los procesos sanitarios. Los profesionales sanitarios tenemos que conocer esta tecnología, sus ventajas y sus inconvenientes, porque va a ser una parte integral de nuestro trabajo.

En estos dos artículos pretendemos dar una visión básica de esta tecnología adaptada a los médicos con un repaso de su historia y evolución, de sus aplicaciones reales en el momento actual y una visión de un futuro en el que la IA y el Big Data van a conformar la medicina personalizada que caracterizará al siglo XXI.

© 2020 Los Autores. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: joseavil@gmail.com (J.F. Avila-Tomás).

KEYWORDS

Artificial intelligence;
AI;
medicine;
health;
robotics;
Big

Artificial intelligence and its applications in medicine I: introductory background to AI and robotics

Abstract Technology and medicine follow a parallel path during the last decades. Technological advances are changing the concept of health and health needs are influencing the development of technology.

Artificial intelligence (AI) is made up of a series of sufficiently trained logical algorithms from which machines are capable of making decisions for specific cases based on general rules.

This technology has applications in the diagnosis and follow-up of patients with an individualized prognostic evaluation of them.

Furthermore, if we combine this technology with robotics, we can create intelligent machines that make more efficient diagnostic proposals in their work.

Therefore, AI is going to be a technology present in our daily work through machines or computer programs, which in a more or less transparent way for the user, will become a daily reality in health processes. Health professionals have to know this technology, its advantages and disadvantages, because it will be an integral part of our work.

In these two articles we intend to give a basic vision of this technology adapted to doctors with a review of its history and evolution, its real applications at the present time and a vision of a future in which AI and Big Data will shape the personalized medicine that will characterize the 21st century.

© 2020 The Authors. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La inteligencia artificial (IA) es una rama de las ciencias de la computación que incluye conceptos muy transversales relacionados con la lógica y el aprendizaje¹. Se trata, por lo tanto, de diseñar herramientas informáticas que simulen procesos de inteligencia humana que incluyen el aprendizaje, el razonamiento y la autocorrección². Mediante diversos algoritmos las máquinas «aprenden» y son capaces de «tomar decisiones». No se trata de ciencia ficción, sino de una realidad que está presente actualmente y que poco a poco va a ir ocupando espacios cotidianos en nuestra casa, en nuestros vehículos y también relacionados con nuestra salud.

La teoría del procesamiento de la información de Mahoney³ considera al ser humano como un procesador de información a partir de estímulos internos y externos que va almacenando en memoria y que es capaz de elaborar respuestas similares a partir de estímulos posteriores que tengan cierta similitud. Según esta teoría los elementos estructurales en el procesamiento de la información son: registro sensitivo (recepción de información interna y externa), memoria a corto plazo (almacenamiento inmediato de la información seleccionada) y memoria a largo plazo (que organiza y dispone la información durante más tiempo). Además, las categorías del procesamiento son: atención (recibe, selecciona y asimila los diferentes estímulos), codificación (simboliza los estímulos según estructuras mentales propias), almacenamiento (organiza y mantiene en la memoria los símbolos codificados) y recuperación (uso posterior de la información organizada y codificada ante estímulos similares a los que la han ocasionado).

El aprendizaje humano se basaría en la exposición a situaciones repetidas con refuerzos (positivos o negativos) cada

vez que tomamos una decisión correcta o erramos. A partir de estímulos similares que tienen soluciones similares y a través de nuestra experiencia y conocimientos previos, empezamos a tomar decisiones⁴. La toma de decisiones supone un pensamiento lógico y jerárquico que puede ser transcrito a algoritmos en un lenguaje que las máquinas pueden interpretar y ejecutar con mucha mayor rapidez que el ser humano.

El aprendizaje humano es progresivo y se desarrolla a partir de la exposición a situaciones de forma consecutiva, proceso que puede llevar años, en cambio, la adquisición de estos datos por parte de una máquina es mucho más rápida, ya que esta no se agota (puede trabajar 24 h al día) y no tiene funciones vitales (alimentación, descanso u ocio). En este sentido las cantidades ingentes de datos en múltiples formatos y fuentes (lo que conocemos como *big data*), tienen una relación directa con la adquisición de experiencia por parte de las máquinas que se exponen a situaciones o estímulos muy diversos. En este artículo pretendemos dar una visión introductoria de la IA para médicos y realizar un recorrido por las principales aplicaciones en salud que nos ofrece esta tecnología.

Redes neuronales, cerebro y aprendizaje

La base biológica de la inteligencia está en el cerebro. Aunque vamos conociendo cada vez más sobre su fisiología y las diferentes vías anatómicas y funcionales que participan en el proceso de aprendizaje humano, aún existen muchas incógnitas que deben despejarse.

Para las máquinas existe una analogía similar a la estructura y el funcionamiento del cerebro, por lo que es relativamente sencillo establecer esta analogía fácilmente comprensible para los profesionales de la salud.

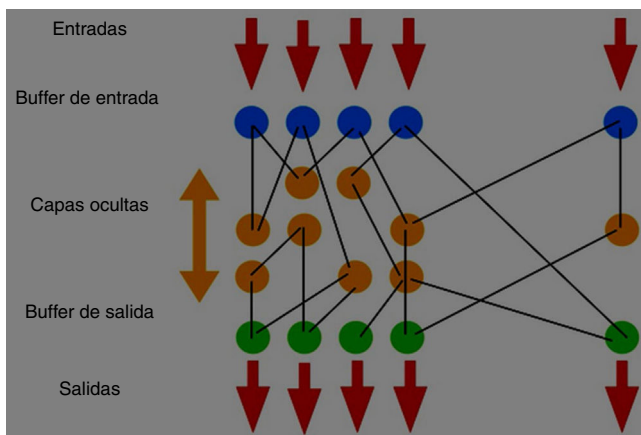


Figura 1 Esquema de una red neuronal.
Fuente: Elaboración propia.

Las redes neuronales artificiales, en inglés *Artificial Neural Networks* (ANN) están compuestas por elementos que se comporten de forma similar a la neurona biológica en sus funciones más comunes y que se denominan «elemento procesador», en inglés *Process Element* (PE). Cada uno de los PE (neuronas) tienen unos elementos de entrada (dendritas) que recogen los impulsos de entrada que son integrados en el cuerpo del elemento procesador y generan una respuesta o salida. La salida del PE (axón) se puede conectar a las entradas de otras neuronas artificiales mediante conexiones con una eficacia similar a la sinapsis de las conexiones neuronales del cerebro⁵. Los PE están organizados en una serie de niveles que se denominan capas. El conjunto de estas capas forman una ANN.

En las ANN existen 2 capas con conexiones con el exterior. Una capa de entrada o *buffer* de entrada, donde se presentan los datos a la red, y una capa de salida que devuelve al exterior la respuesta de la red a una entrada concreta. Existen, además, una serie de capas intermedias que se denominan capas ocultas (fig. 1). Al igual que en los seres humanos, el aprendizaje que se produce en las máquinas, es una función que tiene una base estructural en este tejido nervioso artificial conformado por las ANN.

Existen 2 tipos de métodos que permiten el aprendizaje de una máquina⁶. El primero de ellos se llama «aprendizaje con datos supervisados» y requiere la participación de un humano que determina las relaciones correctas e incorrectas que adquiere la máquina. La función del humano es etiquetar y categorizar los datos de entrada y establecer un algoritmo de toma de decisiones para generar las diferentes salidas. Con el suficiente entrenamiento, la máquina será capaz de determinar la categoría de salida de un nuevo dato de entrada. El segundo método es el «aprendizaje automático o *machine learning*». Consiste en dotar de experiencia a la máquina y que sea ella misma, mediante una serie de normas lógicas iniciales, la que sea capaz de ir aprendiendo de manera independiente a partir de la experiencia que le proporcionan los datos y sin el concurso continuado de un humano. Para ello son necesarios algoritmos iniciales y un pequeño entrenamiento supervisado. Mientras que, en el aprendizaje supervisado, el conocimiento se hace explícito en forma de reglas, en la computación neuronal las ANN generan sus propias reglas aprendiendo de los ejemplos

que se les muestran en la fase de entrenamiento. Una vez que las decisiones correctas alcanzan un número válido dentro del total de decisiones tomadas, conectamos este sistema inteligente a un sistema de *big data* para que esas experiencias afiancen los sistemas de toma de decisiones (aprendizaje).

Antecedentes

Aunque todo este campo de la informática es innovador en algunos aspectos, tiene antecedentes en los años 40 del siglo XX. En 1943, el neurobiólogo Warren McCulloch y el estadístico Walter Pitts, publicaron un artículo que definía que los eventos neuronales y las relaciones entre ellos pueden tratarse mediante la lógica proposicional⁷. De esta manera se conforma la base y el inicio del desarrollo de la IA tal y como hoy la concebimos.

Pero no fue hasta una década más tarde, en 1956, cuando se celebró la primera Conferencia de Inteligencia Artificial en Darmouth que es considerada como la primera referencia seria a las redes neuronales artificiales. En esta conferencia se presentó la lógica teórica (Minsky, McCarthy, Rochester y Shannon) que es considerado el primer programa informático para solucionar problemas de búsqueda heurística⁸.

En 1957 se presentó «Perceptron» el primer sistema capaz de identificar patrones geométricos⁹, y en 1959 «Adaline» (Adaptive Linear Neuron) que fue utilizada con diferentes aplicaciones como reconocimiento de voz y caracteres, predicción del tiempo, y en el desarrollo de filtros para eliminar ecos de las líneas telefónicas.

A partir de estos trabajos la comunidad científica tuvo una percepción muy optimista de lo que la IA podría ofrecer, pero a mediados de la década de los 60 se comenzaron a publicar estudios críticos sobre la falta de aplicabilidad de la computación neuronal. Durante los años 70 y 80 pocos investigadores continuaron con esta línea de desarrollo científico (James Anderson, Teuvo Kohonen o Stephen Grossberg).

En 1982 John Hopfield¹⁰ crea el algoritmo *Backpropagation* que presenta un sistema neuronal formado por elementos procesadores interconectados que tienden a un mínimo de energía. Este hecho supuso volver a confiar en las posibilidades de la IA que en las últimas décadas ha tenido un avance exponencial.

Actualmente existen muchos investigadores en diferentes universidades que están realizando trabajos en el área de las redes neuronales artificiales en grupos multidisciplinares (informáticos, matemáticos, neurólogos, psicólogos del conocimiento, físicos, programadores o filósofos de la ciencia) que ofrecen nuevas e innovadoras perspectivas en esta área del conocimiento.

Inteligencia artificial y robótica

La palabra «robot» procede la palabra checa «*robota*» que significa «trabajo duro»¹¹.

Podemos clasificar los robots en diferentes tipos:

1. No mecánicos: La salida es una acción no mecánica como mostrar una información o mantener una conversación con el usuario humano. Entre ellos destacan los robots cuya interfaz es un sistema conversacional ya sea escrito

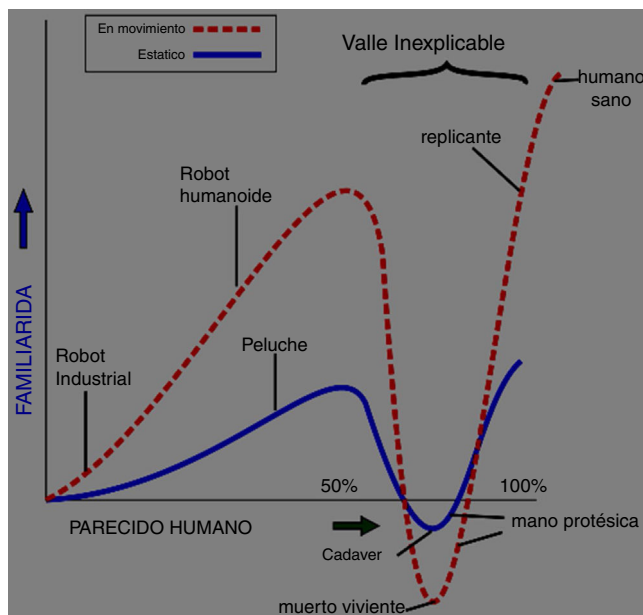


Figura 2 Gráfica de la teoría del «valle inquietante» de Masahiro Mori.

Fuente: Remasterizada por Edgar Talamantes. Bajo licencia libre GNU.

o hablado («chatbots») con grandes aplicaciones actualmente como asistentes virtuales.

2. Mecánicos: Utilizados generalmente en la industria. Hay de varios tipos:
 1. Androides: Apariencia humanoide.
 2. Zoomórficos: Apariencia animal.
 3. Móviles o rodantes: Transporte de cosas o personal.
 4. Poliarticulados: Industriales.

La apariencia humana de los robots ha dado lugar a la denominada «teoría del valle inquietante». «Lo inquietante»¹² tiene su origen como concepto, en el año 1906 por Ernst Jentsch¹³ y se explica como una sensación perturbadora ante algo que nos es y no familiar al mismo tiempo. Una situación u objeto que se parece mucho a algo cotidiano, que conocemos bien pero que nos genera una sensación de cierta ansiedad o malestar sin que podamos explicar el motivo.

Esta teoría de lo inquietante se retoma en 1970 por Masahiro Mori para describir la relación entre los robots y los humanos. La relación es cada vez más positiva siempre y cuando el robot mantenga apariencia de robot y seamos conscientes de que se trata de una máquina. Cuando el robot va adquiriendo rasgos antropomórficos hasta llegar a presentar aspecto humano, la respuesta emocional del humano se irá haciendo cada vez más negativa hasta llegar a un punto de rechazo debido a la «inquietud» que genera (fig. 2).

En la cultura occidental, sobre todo por la influencia cultural del cine, tenemos una imagen futurista de los robots como humanoides, cuando la realidad actual es otra, vivimos rodeados de IA y robótica. Así la Industria v.4.0¹⁴ se fundamenta en la realidad virtual, la IA y el Internet de las cosas.

Los *cobots* o robots colaborativos fueron inventados en 1996 por J. Edward Colgate y Michael Peshkin, profesores

en la Northwest University (Kirkland, Washington) como dispositivos robóticos que manipulan objetos en colaboración con un operador humano¹⁵. Actualmente están dotados de IA para mejorar su rendimiento con la monitorización de numerosas variables como las condiciones del lugar de trabajo, visión artificial, identificación de patrones para predecir o detectar errores, pudiendo comunicar dicha información a otros *cobots*. Un sector que ha tenido un aumento de un 23% de 2017 a 2018, según la Federación Internacional de Robótica (IFR)¹⁶.

Ya tenemos robots funcionando para la realización de pruebas y análisis de laboratorio. Así en el Hospital Universitario de Copenhague, Gentofte (Dinamarca)¹⁷, un primer robot recoge la muestra de sangre y la coloca en un lector de códigos de barras. A continuación, una cámara de visión fotografía el color del tapón roscado e indica al robot que coloque la muestra en una de las 4 gradillas en función de su color. Luego un segundo robot recoge las muestras de las gradillas y las coloca en el alimentador de la máquina para su centrifugado y análisis. Estos robots manipulan alrededor de 3.000 muestras diarias (unos 7-8 tubos por minuto), lo que ha mejorado los tiempos de entrega de resultados.

Video: <https://www.youtube.com/watch?v=mnk4iT4BTg4>

Ya se están probando en pacientes tetrapléjicos exoesqueletos, unidades robóticas controladas por placas de computadora para alimentar un sistema de motores, neumáticos, palancas o sistemas hidráulicos para restaurar la locomoción¹⁸. Han surgido como una nueva herramienta de rehabilitación en lesionados medulares. Sin embargo, todavía falta evidencia para respaldar su aplicación clínica teniendo en cuenta su alto coste¹⁹.

La universidad de Brown está explorando con tecnología Intel® un proyecto de Interfaz Inteligente de Columna que tiene como objetivo utilizar la tecnología de IA para restaurar el movimiento y el control de la vejiga en pacientes con parálisis por lesiones graves de la médula espinal²⁰. Un equipo internacional de científicos ya ha utilizado una «interfaz cerebro-espinal» inalámbrica para evitar las lesiones de la médula espinal en un par de macacos *Rhesus*, restaurando el movimiento intencional de caminar en una pierna temporalmente paralizada²¹.

La robótica en medicina no se limita a los ejemplos anteriores, las investigaciones en este campo se han dirigido a la asistencia a los pacientes y la asistencia o formación a los médicos. Así tenemos prótesis de miembros, electroestimulación, asistentes personales, robótica de rehabilitación, robótica quirúrgica²², la formación médica con simuladores robotizados y los robots de almacenaje y distribución de medicamentos.

Desde los años 60, las prótesis de miembros han evolucionado constantemente, con distintos modelos para sustituir las primeras prótesis pasivas, todavía presentes en gran parte del mundo por su menor coste, por prótesis activas, las cuales por medio de medios mecánicos o sensores ubicados en alguna parte del cuerpo del paciente permiten mover por ejemplo una mano mecánica²³.

Hay distintos modelos y soluciones de prótesis de mano en continua evolución y mejora para aumentar su funcionalidad, como las 2 generaciones de manos DLR²⁴, la TUAT/Karlsruhe²⁵, la Blackfingers²⁶, la mano robótica con mecanismo extensor²⁷, la mano compuesta de sensores propioceptivos²⁸ o la mano Iowa® fruto de un trabajo de

colaboración entre universidades americanas, españolas y suecas²⁹, entre otros.

En cuanto a la robótica quirúrgica también ha evolucionado progresivamente desde el primer procedimiento neuroquirúrgico asistido por un robot en 1985, donde se utilizó el robot industrial PUMA 560 (no diseñado para labores médicas) para introducir una guía para una biopsia cerebral³⁰. Posteriormente se empezaron a diseñar los primeros robots, puramente quirúrgicos, como asistentes del cirujano en operaciones de múltiples órganos y aparatos. Algunos modelos de robots quirúrgicos son: AESOP® (acrónimo de sistema endoscópico automatizado para un posicionamiento óptimo) empleado como asistente robótico controlado por voz para cirugía endoscópica³¹, el robot estereotáctico NeuroMate®³² que es un sistema que se utiliza en centros neuroquirúrgicos para administrar tratamientos y realizar procedimientos de estimulación cerebral profunda, neuroendoscopia, estereoelectroencefalografía, biopsias e investigación; el extinto sistema robótico ZEUS®³³ con el que se realizó la primera telecirugía del mundo en 2001³⁴, conocida como la operación Lindbergh, una exitosa colecistectomía laparoscópica de dos horas de duración, que se realizó en una paciente en un hospital de Estrasburgo, Francia, realizada por un equipo quirúrgico en Nueva York, EE. UU., el Sistema Robótico Quirúrgico Da Vinci®³⁵ que en su versión más reciente, el sistema da Vinci Xi® permite una visión en 3D con un aumento de hasta 10 veces y elimina el temblor fisiológico, utilizándose principalmente en intervenciones de urología, cirugía general y ginecología oncológica, pero también en cirugía oral y maxilofacial, cirugía pediátrica, cirugía torácica o cirugía cardíaca; Probot®, diseñado para realizar prostatectomías³⁶, Robodoc® para cirugía ortopédica³⁷, Acrobot® para cirugía de rodilla³⁸ y CyberKnife®³⁹ sistema de radiocirugía robótica diseñado para tratar tumores ubicados en todo el cuerpo de manera no invasiva, entre otros.

El principal problema para su expansión es el alto coste de instalación y mantenimiento de los mismos, de ahí el

Tabla 1 Beneficios y limitaciones de la cirugía robótica respecto a la cirugía mínimamente invasiva convencional

Beneficios	Limitaciones
Visión en 3D y alta resolución	Tamaño del robot
Movimientos intuitivos	Variedad de instrumentos limitada
Control del temblor	Tiempo de preparación del robot
Movimientos a escala	Rango de movimientos limitado
Mejor ergonomía	Muy caro de comprar y mantener
Curva de aprendizaje más corta	Desechables muy caros

Fuente: Tomado de van Haasteren et al⁴³.

desarrollo de sistemas más recientes y más asequibles, como por ejemplo:

- El sistema quirúrgico Senhance®⁴⁰. plataforma laparoscópica digital que elimina las limitaciones económicas de los sistemas robóticos actuales con instrumentos reutilizables estándar y una estrategia de arquitectura de plataforma abierta que permite a los hospitales aprovechar las inversiones en tecnología existentes.
- El sistema robótico Flex®⁴¹ que permite acceder a ubicaciones anatómicas antes difíciles o imposibles de alcanzar de forma mínimamente invasiva.
- El proyecto español BROCA, también conocido como «el pequeño de Da Vinci®»⁴², para el diseño y desarrollo de un sistema robótico quirúrgico de bajo costo, modular, para cirugía mínimamente invasiva centrada en cirugía pélvica y bariátrica, con sensores y efectores finales altamente maniobrables para obtener información relevante

Tabla 2 Fortalezas y limitaciones de humanos y robots respecto a la cirugía

Fortalezas	Limitaciones
<i>Humanos</i>	
Buen juicio	Destreza limitada más allá de los movimientos naturales
Buena coordinación mano-vista	Propenso a la fatiga y la falta de atención
Gran destreza	El temblor limita el movimiento fino
Puede integrar información de diversas fuentes	Efectores finales voluminosos (manos)
Entrenamiento sencillo	Limitada precisión geométrica
Versátil y capaz de improvisar	Difícil de mantener estéril
<i>Robots</i>	
Buena precisión geométrica	Juicio reducido
Incansable y estable	Difícil adaptación a nuevas situaciones
Resistente a la radiación ionizante	Destreza limitada
Puede diseñarse para operar diferentes escalas de movimiento y carga útil	Coordinación mano-vista limitada
Capaz de utilizar múltiples sensores	Capacidad limitada para integrar e interpretar información compleja

Fuente: Adaptado de Taylor RH⁴⁴.

de la herramienta y su entorno, además de incorporar la sensación de tacto.

La cirugía asistida por robot ha permitido avances en el campo quirúrgico como la cirugía a distancia y la cirugía mínimamente invasiva, junto a ventajas de precisión, incisiones más pequeñas, menor pérdida de sangre, disminución del dolor y tiempo de curación menor⁴², lo que permite tratar un mayor número de pacientes con menor tiempo de hospitalización, haciendo que sea posible realizar intervenciones que de otro modo no serían viables.

La cirugía robótica presenta una serie de ventajas y de limitaciones respecto a la cirugía mínimamente invasiva convencional (tabla 1). Las ventajas suelen venir de explotar fortalezas complementarias entre humanos y dispositivos robóticos, como vemos resumido en la tabla 2.

Financiación

Este artículo no ha recibido ningún tipo de ayuda o financiación de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Bibliografía

- Torra V. La inteligencia artificial. LYCHNOS. Fundación General del CSIC [consultado 6 Mar 2019] Disponible en: http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/inteligencia_artificial.
- Rouse M ¿Qué es Inteligencia artificial, o AI? - Definición en Whatsl.com. Techtarger [consultado 6 Mar 2019] Disponible en: <https://searchdatacenter.techtarger.com/es/definicion/Inteligencia-artificial-o-AI>.
- La teoría del procesamiento de la información de Mahoney. RODAS. Repositorio de Objetos de Aprendizaje de la Universidad de Sevilla [consultado 4 Mar 2019] Disponible en: https://rodas5.us.es/file/1240b064-8389-6228-96a5-653dd137f73b/1/capitulo3.SCORM.zip/pagina_22.htm.
- Domjan M. Principios de aprendizaje y conducta. Madrid: Thomson; 2012.
- Basogai-Olabé X. Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao. Bilbao: Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao [consultado 4 Mar 2019] Disponible en: https://ocw.ehu.es/file.php/102/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf.
- Sancho-Caparrini F. Clasificación Supervisada y No Supervisada. Fernando Sancho Caparrini [consultado 7 Mar 2019] Disponible en: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=77>.
- McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943;5:115–33 [consultado 7 Mar 2019]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/BF02478259>.
- Conferencia de Dartmouth 1956. [consultado 7 Mar 2019] Disponible en: <https://dartmouthconference.wordpress.com/>.
- Ramirez F. Big Data & Data Science Blog: Historia de la IA: Frank Rosenblatt y el Mark I Perceptrón, el primer ordenador fabricado específicamente para crear redes neuronales en 1957 [consultado 7 Mar 2019] Disponible en: <https://web.archive.org/web/20180722124753/https://data-speaks.luca-d3.com/2018/07/historia-de-la-ia-frank-rosenblatt-y-el.html#>.
- Hopfield JJ. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1982;79:2554–8 [consultado 7 Mar 2019]. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/pnas/79/8/2554.full.pdf>.
- Robot. En: Wikipedia, la enciclopedia libre, 2019 [citado 9 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Robot&oldid=114426400>.
- Collins J, Jervis J. Document: 'On the Psychology of the Uncanny' (1906): Ernst Jentsch. En: Collins J, Jervis J, editores. *Uncanny Modernity: Cultural Theories, Modern Anxieties*. London: Palgrave Macmillan UK; 2008. p. 216–28 [consultado 9 Mar 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1057/9780230582828.12>.
- Jentsch E. On the Psychology of the Uncanny. 1906 [consultado 9 Mar 2019]. Disponible en: http://www.art3idea.psu.edu/locus/Jentsch_uncanny.pdf.
- European Commission. The Fourth Industrial Revolution. 2019 [consultado 23 Mar 2019] Disponible en: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/fourth-industrial-revolution>.
- Colgate JE, Wannasuphprasit W, Peshkin MA. Cobots: robots for collaboration with human operators. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. Atlanta GA, 58:433-439 [consultado 9 Mar 2019]. Disponible en: https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/1996_Colgate_CobotsRobotsCollaboration.pdf.
- IFR Press Release. Industrial Robots: Robot Investment Reaches Record 16.5 billion USD. Shanghai, Frankfurt, Sep 18, 2019 [consultado 9 Mar 2019] Disponible en: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-investment-reaches-record-16.5-billion-usd>.
- Gentofte Hospital. Nota de prensa. El nuevo super robot y bioanalista danés colaboran estrechamente en los análisis de sangre [Ny dansk superrobot og bioanalytiker arbejder tæt sammen om blodprøver], Nov 25, 2014. 2019 [consultado 17 May 2019]. Disponible en: <https://www.gentoftehospital.dk/presse-og-nyt/pressemeddelelser-og-nyheder/nyheder/Sider/ny-dansk-superrobot-og-bioanalytiker-arbejder-taet-sammen-om-blodproever.asp>.
- Benabid AL, Costecalde T, Eliseyev A, Charvet G, Verney A, Karakas S, et al. An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: A proof-of-concept demonstration. *The Lancet Neurology*. 2019 [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: [https://www.thelancet.com/journals/lanneur/article/PIIS1474-4422\(19\)30321-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanneur/article/PIIS1474-4422(19)30321-7/fulltext).
- Gorgey AS. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *WJO*. 2018;9:112–9 [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6153133/>.
- Researchers to develop 'intelligent spinal interface' with \$6.3 million in DARPA funding. Brown University [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: <https://www.brown.edu/news/2019-10-03/isi>.
- Capogrosso M, Milekovic T, Borton D, Wagner F, Moraud EM, Mignardot J-B, et al. A brain-spine interface alleviating gait deficits after spinal cord injury in primates. *Nature*. 2016;539 [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature20118>.
- Krut S. Introduction to Medical Robotics. Conferencia. VI Seminario de Automática. Popayán. 2006.
- Shimoga KB. Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey. *The International Journal of Robotics Research*. 1996;15:230–66 [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/027836499601500302>.
- Borst C, Fischer M, Haidacher S, Liu H, Hirzinger G. DLR Hand II: Experiments and experience with an anthropomorphic hand. Robotics and Automation 2003. Taipei: Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference; 2003 [consultado 7 Oct 2019]. Disponible en: <http://eia.udg.es/~qsalvi/papers/2003-ICRA-Credits.pdf>.

25. Fukaya N, Toyama S, Asfour T, Rüdiger D. Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand. Takamatsu: Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000); 2000 [consultado 10 Oct 2019]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/895225>.
26. Folgheraiter M, Gini G. Blackfingers an artificial hand that copies human hand in structure, size, and function. *Humanoids*. 2000 [consultado 10 Oct 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/c417/1da51eee7823ff6cd2f5486c9d70fe531162.pdf>.
27. Wilkinson D, Vande-Weghe M, Matsuoka Y. An extensor mechanism for an anatomical robotic hand. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation: Taipei; 2003 [consultado 10 Oct 2019]. Disponible en: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/wilkinson_david_d_2003_1/wilkinson_david_d_2003_1.pdf.
28. Carrozza, Cappiello MC, Micera G, Edin S, Beccai BB, Cipriani LC. Design of a cybernetic hand for perception and action. *Biol Cybern*. 2006;95:629–44.
29. Yang J, Peña-Pitarch E, Abdel-Malek K, Patrick A, Lindkvist L. A multi-fingered hand prosthesis. *Mechanism and Machine Theory*. 2004;39:555–81.
30. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1988;35:153–60.
31. Stoianovici D. Robotic surgery. *World J Urol*. 2000;18:289–95.
32. Varma TR. Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for movement disorder surgery. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2003;80:132–5.
33. Marescaux J, Rubino F. The Zeus robotic system: Experimental and clinical applications. *Surg Clin N Am*. 2004;83:1305–15.
34. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*. 2001;413:379–80.
35. Ballantyne GH, Moll F. The da Vinci telerobotic surgical system: The virtual operative field and telepresence surgery. *Surg Clin N Am*. 2003;83:1293–304.
36. Davies BL, Hibberd RD, Timoney AG, Wickham JEA. A clinically applied robot for prostatectomias. En: Taylor RH, Lavallee S, Burdea GC, Mosges R, editores. *Computer-Integrated Surgery*. MIT Press; 1995. p. 593–601.
37. Nogler M, Polikeit A, Wimmer C, Bruckner A, Ferguson SJ, Krismer M. Primary stability of a Robodoc implanted anatomical stem versus manual implantation. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2004;19:123–9.
38. Jakopcic M, Harris S, Rodríguez-Baena F, Gomes P, Davies B. The Acrobot system for total knee replacement. *Industrial Robot*. 2003;19:902–11, <http://dx.doi.org/10.1108/01439910310457724>.
39. Gerszten PC, Ozhasoglu C, Burton SA, Vogel WJ, Atkins BA, Kalnicki S, et al. CyberKnife frameless stereotactic radiosurgery for spinal lesions: Clinical experience in 125 cases. *Neurosurgery*. 2004;55:89–98.
40. Schmitz R, Willeke F, Barr J, Scheidt M, Saelzer H, Darwich I, et al. Robotic Inguinal Hernia Repair (TAPP) First Experience with the New Senhance Robotic System. *Surg Technol Int*. 2019;34:243–9.
41. Lang S, Mattheis S, Hasskamp P, Lawson G, Güldner C, Mandapathil M, et al. A european multicenter study evaluating the flex robotic system in transoral robotic surgery. *Laryngoscope*. 2017;127:391–5.
42. Proyecto BROCA - Inicio [consultado 10 Oct 2019]. Disponible en: <http://proyecto-broca.es/>.
43. van Haasteren G, Levine S, Hayes W. Pediatric robotic surgery: Early assessment. *Pediatrics*. 2009;124:1642–9.
44. Taylor RH. A Perspective on Medical Robotics. *Proceedings of the IEEE*. 2006;94:1652–64, 94.