

La nueva robótica: hacia el ser humano máquinas

Stefan Schaal¹

¹Ciencias de la Computación y Neurociencia, Universidad del Sur de California, 3710 S. McClintock Avenue—RTH 401, Los Ángeles, California 90089-2905 y ATR Computational Neuroscience Laboratories, 2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kioto 619-02

Recibido el 26 de diciembre de 2006; aceptado el 21 de mayo de 2007; publicado en línea el 16 de julio de 2007)

La investigación en robótica se ha alejado de su enfoque principal en la industria. aplicaciones. La Nueva Robótica es una visión que se ha desarrollado en los últimos años por nuestra propia universidad y muchas otras investigaciones nacionales e internacionales. instituciones y aborda cómo cada vez más robots con apariencia humana pueden vivir entre nosotros y asumir tareas en las que nuestra sociedad actual tiene deficiencias. Mayor atención, fisioterapia, educación infantil, búsqueda y rescate, y atención general asistencia en situaciones de la vida diaria son algunos de los ejemplos que se beneficiarán de la Nueva Robótica en un futuro próximo. Con estos objetivos en mente, la investigación para el La Nueva Robótica debe adoptar un enfoque interdisciplinario amplio, que abarque desde desde cuestiones matemáticas tradicionales de la robótica hasta cuestiones novedosas en psicología, neurociencia y ética. Este artículo describe algunas de las investigaciones importantes Problemas que será necesario resolver para hacer realidad la Nueva Robótica. [DOI: 10.2976/1.2748612]

CORRESPONDENCIA

Stefan Schaal: sschaal@usc.edu

En 1921, la obra de Karel Capek, *Rossum's Universal Robots*, considerada en gran medida el comienzo de la era de la robótica [por ejemplo, [Sciavicco y Siciliano](#) (1996)]—proporcionó dos visiones interesantes. Primero, los robots eran parecidos a los humanos, y segundo, interactuaban con los humanos de una manera natural, es decir, parecida a la humana. Durante más de medio siglo después de la concepción del robot por parte de Capek, las realizaciones en robótica quedaron muy por detrás de sus ideas: los robots eran dispositivos mecánicos minimalistas, lejos de lograr cualquier aspecto humano general rendimiento, y esencialmente hubo No hay interacción entre humanos y robots, excepto cuando un programador carga el código. Por supuesto, todo esto hizo sentido, ya que los robots se usaban simplemente para Tareas de posicionamiento altamente repetitivas y de alta precisión en la industria. y esta en este dominio que, hasta ahora, los robots tienen marcó la diferencia y contribuyó en vías útiles para el avance de la tecnología y la productividad industrial.

El comienzo del siglo XXI, sin embargo, fue testigo de un notable

Cambio en el enfoque de investigación de la robótica. Tal como lo inició la inteligencia artificial en los años 1980 y 1990, Siempre ha habido un gran interés en generar máquinas robóticas más inteligentes y de uso más general. como hubo poca aplicación para este tipo de robots en industria—es decir, los robots industriales para propósitos especiales son difíciles de superar en productividad en la tarea para la que fueron diseñados—trabajo en robots inteligentes Inicialmente se limitó en gran medida a la investigación universitaria y a algunas investigaciones únicas. programas como exploración espacial, exploración submarina, etc. Con el avance de la tecnología de la información y diseño mecánico, sin embargo, el de Capek visión humana, autónoma y Los robots interactivos se han ido acercando progresivamente a los prototipos de investigación. A finales de los años 1990, un nuevo campo de la robótica se volvió prominente, humanoide robótica, principalmente a través de la innovación trabajar en la Universidad de Waseda, Sarcos Inc., y Honda Corporation [por ejemplo, para un descripción general, ver [Menzel y D'Alusio](#)

Revista HFSP

(2000)). En estos lugares, los primeros robots humanoides de cuerpo completo. fueron construidos y presentados a la comunidad de investigación y prensa popular. Serie Wabian de humanos de la Universidad de Waseda Los robots se centraron principalmente en las habilidades para caminar bípedos, al igual que el robot Asimo de Honda, que, debido a su asociación con un gran empresa y su aspecto muy refinado, ha recibido Mucha atención en todo el mundo. El humanoide Sarcos

El robot "DB" se centró en habilidades de manipulación autónoma, de diez combinadas con habilidades de aprendizaje que se derivaron de ideas de la neurociencia computacional (Atkeson et al., 2000). Actualmente existen numerosos robots humanoides, principalmente en Asia y Japón en particular, pero también en Europa y el A NOSOTROS. Desde el año 2000 existe incluso una conferencia especializada dedicada a la robótica humanoide, la Conferencia Internacional IEEE/RAS sobre Robótica Humanoide.

Además del desafío científico de larga data de comprender cómo funciona el cerebro humano y cómo crear una sistema artificial con capacidades similares a las de los humanos, ¿tiene alguna utilidad tener robots humanoides? De

el punto de vista de la manufactura tradicional en la industria, el

La respuesta probablemente sería negativa, ya que la relación costo/beneficio de robots humanoides es, hasta ahora y en el futuro medio,

bastante poco atractivo. Pero lo más probable es que la industria tradicional no en qué va a impactar la Nueva Robótica. Más bien, los robots humanoides y similares serán parte de nuestra vida normal, es decir,

Asumirán funciones en nuestra sociedad donde hay simplemente muy pocos seres humanos para hacer frente a las necesidades de la sociedad. Esta demanda ha sido reconocida y presentada por muchos países. en el mundo, a menudo provocado por la tendencia al aumento de la proporción de personas mayores en la sociedad y los sectores asociados.

peligro de una futura escasez de cuidados adecuados. Sin embargo, hay muchas otras áreas en las que los robots pueden resultar útiles.

El trabajo en entornos peligrosos y las misiones de búsqueda y rescate después de desastres se encuentran entre los temas más comúnmente mencionados. Los robots también pueden actuar como fisioterapeutas para

Ayudar a los pacientes a hacer ejercicio correctamente y recuperar el motor perdido. funciones: por ejemplo, la falta de fisioterapeutas proporciona a los pacientes con accidente cerebrovascular en los EE. UU. sólo unos 40 minutos de entrenamiento por día, mientras que se necesitarían alrededor de 6 ha por día en el período inmediatamente posterior al ictus para recuperar las funciones motoras (Taub y Lobo, 1997; van der Lee y otros, 1999; Lobo y Blanton,

1999), ¿no sería bueno si uno pudiera "verificar" un robot?

¿Fisioterapeuta de la farmacia local? Por supuesto, los robots podrían ayudar a alcanzar, transportar y manipular objetos a personas en convalecencia y con discapacidades.

El tema a menudo se discute bajo el nombre de robótica personal. o robótica de asistencia. Estos robots también pueden asumir funciones cognitivas y de tutoría, como recordar a las personas que tomen

sus medicamentos a tiempo, o para no olvidar otros programados actividades. También hay oportunidades interesantes para los robots.

en la educación y la vida diaria de los niños. Por ejemplo, Los niños autistas parecen reaccionar muy positivamente a la educación.

juegos con robots (por ejemplo, Robins et al., 2005). y robots también podrían convertirse en compañeros de juego y ayudantes educativos en



Figura 1. Esbozo artístico de la futura participación de los robots en la sociedad: „a... robots de asistencia, „b... robots compañeros de juego en niños educación, „c... robots para tutoría y asistencia en tareas de manipulación, „d... robots que enseñan ejercicios de movimiento, „e... robots personales para personas mayores, „f... robots para vigilancia y protección de niños y adultos.

escenarios escolares tales que los niños se interesen y mantengan en la educación superior en ciencia y tecnología. Muchos

Aquí se podrían enumerar más escenarios—Fig. 1 proporciona boceto de un artista de algunas de estas ideas.

Es importante recalcar que la Nueva Robótica va a estar centrada en el ser humano¹, es decir, los robots trabajarán con humanos en entornos humanos normales. Y es en este papel de

robots de asistencia que muchos componentes nuevos e interdisciplinarios pasan a formar parte de la investigación en robótica. Por ejemplo, si se supone que niños y adultos aceptan un robot, necesita adherirse a ciertos comportamientos y estándares sociales que nosotros, como seres humanos, consideramos aceptable. Por lo tanto, es necesario explorar la psicología y la ética de la interacción entre humanos y robots. Si un robot va a actuar como fisioterapeuta, el robot debe incorporar conocimientos sobre las deficiencias neurales y musculoesqueléticas de un paciente, y adaptar ejercicios y sugerencias de mejora en consecuencia. Esencialmente, tales Un robot debe tener algún conocimiento de cómo funciona el cerebro humano. controla el movimiento, y cómo las deficiencias neuronales, por ejemplo, debido a accidente cerebrovascular, afectan las capacidades de movimiento de un paciente. O, si se supone que un robot debe trabajar en un entorno humano con la mismos objetos y herramientas que los humanos utilizamos en la vida diaria, puede ser Es beneficioso comprender cómo los humanos logran la motricidad. habilidades y cómo se estructura el repertorio de habilidades humanas. De este modo,

¹También hay algunos talleres dedicados a la robótica centrada en el ser humano que se han iniciado recientemente, por ejemplo, el Taller Internacional sobre Robótica Centrada en el Ser Humano.

Robóticos, tradicionalmente profundamente arraigados en la matemática aplicada, la mecánica, la teoría del control y la teoría de la optimización.

De repente nos enfrentamos a una gran cantidad de temas nuevos que van desde la psicología, la biología y la neurociencia hasta la ética. El

La nueva robótica requerirá un nuevo tipo de científico que pueda recorrer una gama muy amplia de disciplinas diferentes.

La Figura 2 es un intento de estructurar los temas de investigación en esta nueva robótica centrada en el ser humano en tres categorías principales: (i) acción, (ii) interacción y (iii) compromiso. Investigación para la Acción se ocupa principalmente de cuestiones de control motor en ambos humanos y robots. La investigación sobre interacción enfatiza la interacción entre robot humano o robot-robot, es decir, la investigación básica de cómo dos sistemas pueden actuar juntos para lograr un objetivo: en un extremo, esto significa que un sistema, por ejemplo, el humano, instruye al otro sistema, el robot, qué hacer. En el otro extremo, los dos sistemas podrían trabajar juntos para lograr una meta, por ejemplo, como llevar juntos un objeto pesado. Finalmente, la investigación sobre el compromiso examina los aspectos cognitivos y Componentes psicológicos de la robótica centrada en el ser humano. Naturalmente, la estructura sugerida en la Fig. 2 no es nítida, es decir, Existe una gran superposición entre la investigación sobre acción, interacción y compromiso. La lista de temas de investigación de la figura 2 tampoco es exhaustiva. Pero con el propósito de dar una perspectiva sobre el futuro de la investigación en robótica y con el fin de Si revisamos alguna literatura reciente relevante, la figura 2 proporciona una guía útil para las próximas secciones de este documento. Debería Cabe señalar que en la literatura se pueden encontrar varias otras perspectivas del futuro de la robótica (por ejemplo, [Khatib et al., 2004](#); [Brock et al., 2005](#)).

INVESTIGACIÓN PARA LA ACCIÓN

La investigación-acción se basa en la teoría del control motor, que se desarrolló en gran medida en campos de la ingeniería clásica como cibernética ([Wiener, 1948](#)), control óptimo ([Bellman, 1957](#)) y la teoría del control ([Slotine y Li, 1991](#); [Narendra y Annaswamy, 2005](#)). Estos campos abordaron muchos aspectos cruciales Problemas de los sistemas de movimiento, incluida la retroalimentación negativa.

control, control anticipativo, control no lineal, movimiento planificación con criterios de optimización, estabilidad, control con sistema retardado en el tiempo, control adaptativo, control estocástico, estimación del estado, control de sobreactuación y subactuación sistemas, etc. La Figura 3 ilustra un diagrama de control clásico para control de motores que resalta las diferentes etapas de un circuito de control, cada una de las cuales está asociada con un gran número de temas de investigación. Muchos de estos temas han recibido amplia atención en la investigación de la robótica de tal manera que se han convertido conocimiento de los libros de texto (p. ej., [Russell y Norvig, 1995](#); [Scia Vicco y Siciliano, 2000](#)). Sin embargo, varias cuestiones merecen atención especial. Cabe señalar que una gran cantidad de La investigación en control biológico motor se centra en temas similares a los de la Fig. 3 ([Sabes, 2000](#); [Schaal y Schweighofer, 2005](#); [Shadmehr y Wise, 2005](#)).

PRIMITIVAS Y BIBLIOTECAS MOTORAS

Mientras que cuestiones como las transformaciones de coordenadas y el motor

La generación de comandos en robótica (Fig. 3) se entienden bastante bien a estas alturas (p. ej., [Sciavicco y Siciliano, 2000](#)),

Confíe en que alguien le proporcione al robot un plan adecuado.

de qué hacer. En muchos proyectos de robótica, esta parte se toma

realizado por un diseñador humano que crea manualmente el plan para un comportamiento determinado. Si bien este enfoque tiene mucho éxito en

entornos estáticos, la Nueva Robótica es inherentemente

sobre robots que actúan en entornos humanos normales, es decir, dinámicos.

Por lo tanto, surge la pregunta de cómo crear sistemas flexibles y

Control y planificación motora reactiva. Lo más habitual es buscar una respuesta creando una caja de herramientas de movimientos elementales que, en secuencia o superposición, crean un espectro suficientemente amplio de habilidades motoras complejas. llamamos a tal

Los movimientos elementales son primitivos motores, pero en la literatura también se los ha denominado esquemas, comportamientos básicos, opciones, macros, etc. (para una revisión, ver [Mataric, 1998](#); [Schal, 1999](#); [Schaal et al., 2003](#)).

Se pueden distinguir al menos dos tendencias principales en la investigación sobre primitivas de movimiento. Primero, las primitivas de movimiento pueden ser

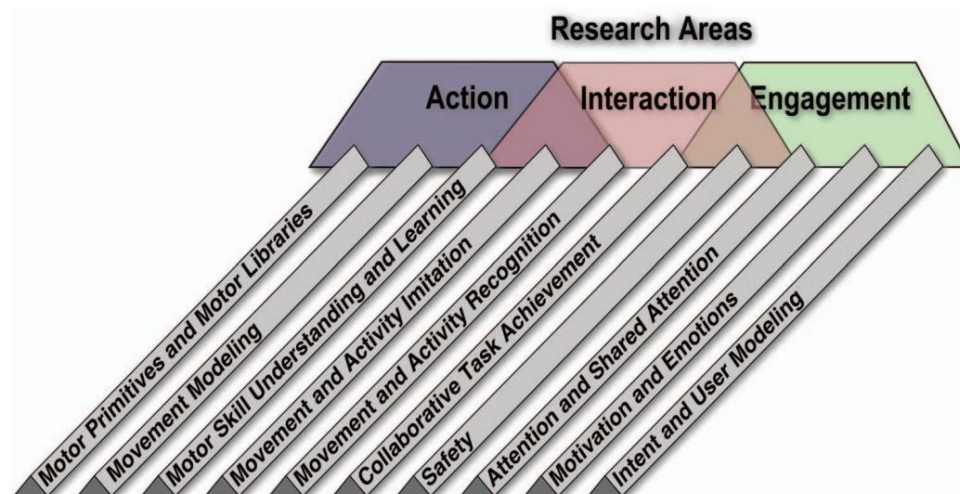


Figura 2. Temas de investigación en Robótica centrada en el ser humano.

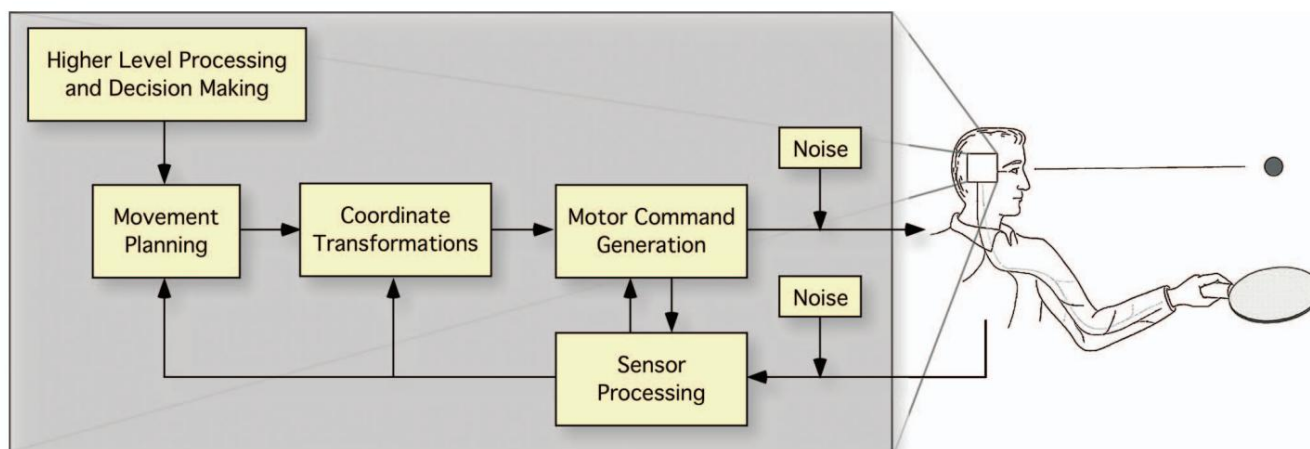


Figura 3. Bosquejo de un diagrama de control genérico que se utiliza habitualmente en la investigación en robótica.

modelados como sistemas dinámicos, como atractores puntuales y límites.

ciclos (por ejemplo, Bullock y Grossberg, 1988; Burridge et al., 1999; Schaal et al., 2004; Righetti e Ijspeert, 2006). El

El enfoque de sistemas dinámicos permite abordar varias cuestiones importantes en el movimiento humano de una manera natural, por ejemplo, problemas de estabilidad, acoplamiento percepción-acción, evitación de obstáculos con campos potenciales, etc. Con frecuencia, los sistemas dinámicos Las primitivas motoras se interpretan fácilmente como unidades conductuales. ej., alcanzar un objetivo, locomoción bípeda, etc. Como inconveniente, a menudo se utiliza el modelado con ecuaciones diferenciales no lineales. bastante complejo y no siempre analíticamente manejable.

El segundo enfoque importante para las primitivas de movimiento es mediante técnicas estadísticas (por ejemplo, Atkeson et al., 2000; Haruno et al., 2001; Doya et al., 2002; Jenkins, 2003; Ina mura et al., 2004). Como ventaja, los métodos estadísticos ofrecen Herramientas y mecanismos bien comprendidos para extraer movimiento. módulos a partir de datos empíricos, de modo que las primitivas de movimiento puede basarse en registros de comportamiento de humanos. Como un desventaja, parece que el movimiento extraído estadísticamente Las primitivas frecuentemente no son significativas desde el punto de vista del comportamiento, como que no está claro qué tan bien estos movimientos primitivos se generalizan a nuevos comportamientos. Además, fenómenos como el acoplamiento percepción-acción, la evitación de obstáculos, etc., no se incluyen naturalmente en los modelos estadísticos de primitivas de movimiento.

Hasta el momento, faltan implementaciones integrales de cualquier enfoque primitivo de movimiento, y es difícil favorecer objetivamente un enfoque sobre el otro.

MODELADO DE MOVIMIENTO

Para operar en entornos construidos para humanos, a menudo resulta ventajoso que los robots empleen sistemas similares. estrategias de movimiento como seres humanos. Además, si los robots se mueven Al igual que los humanos, los humanos los aceptan más fácilmente como socios. debido a nuestra sintonización inherente al movimiento de apariencia natural (Johansson, 1973; Viviani y Schneider, 1991; Viviani et otros, 1997). Por lo tanto, es necesario preguntarse qué principios (o modelos) utilizan los humanos en la generación de movimientos y

¿Cuáles son las estrategias subyacentes de las habilidades motoras humanas?

Estas preguntas son difíciles, ya que han sido abordadas por el campo de la psicología conductual para el control motor y el control neuromotor durante varias décadas (por ejemplo, ver Schmidt, 1988; Arbib, 1995a; Arbib, 1995b; Shadmehr y Wise, 2005) y Todavía faltan conclusiones definitivas.

Sin embargo, es posible destacar varias características del movimiento humano, en particular, si estas características son en gran medida ausente en los sistemas robóticos. Uno de ellos es que la generación del movimiento humano es altamente dócil, mientras que la mayoría Los robots (incluso los modernos) utilizan un control bastante rígido (alta ganancia). El La razón por la que los robóticos prefieren el control de alta ganancia es que reduce la necesidad de modelos precisos del robot y su entorno. ambiente. El control de alta ganancia simplemente significa que la posición y Errores de velocidad entre una trayectoria deseada y una lograda. se multiplican por un número grande y estos resultados luego se agregado a los comandos del motor. Así, pequeñas desviaciones de el movimiento deseado conduce a fuertes órdenes motoras correctivas, es decir, el robot se siente muy rígido. El problema de la rigidez El control es que cualquier perturbación imprevista se combate con esfuerzo muy alto, potencialmente tan alto que el propio robot del medio ambiente puede resultar dañado. Humanos y animales, por otro lado, ceder suavemente a la perturbación, y así Evite dañar el medio ambiente (que puede ser otro ser humano) o a sí mismos. Dado que en un entorno dinámico las colisiones con el medio ambiente son inevitables, conforme El control parece ser crucial para la Nueva Robótica.

Una alternativa al control de alta ganancia es el control de baja ganancia. con modelos feedforward (An et al., 1988; Miall y Wolpert, 1996; Kawato, 1999), es decir, modelos de la dinámica de la robot que apoya la predicción del comando motor óptimo para cualquier posición, velocidad y aceleración de los grados del robot de libertad. En teoría, las especificaciones de diseño de un robot. permiten generar estos modelos con bastante precisión. Pero en la práctica, los modelos teóricos y la dinámica real del robot de diez no coinciden, debido a la compleja dinámica de los actuadores, cables, mangueras, carcasas protectoras, etc., en el robot. Por lo tanto, baja ganancia

El control basado en modelos en robots complejos de apariencia humana es en realidad bastante difícil y todavía es un tema de investigación en curso (Vijaya Kumar y Schaal, 2000; Vijayakumar et al., 2005). El

El tema se vuelve aún más complejo si se tiene en cuenta la dinámica de interacción entre un robot y su entorno.

cuenta: cada sistema de marcha, por ejemplo, tiene estas dinámicas de interacción debido a las fuerzas de reacción del suelo. Las interacciones con el entorno crean restricciones y la matemática del control basado en modelos se vuelve significativamente más compleja.

complejo (Peters et al., 2005a; Nakanishi et al. presentado). Como

Como consecuencia, el control compatible en robots de apariencia humana ha apenas se ha logrado, ni teórica ni experimentalmente (para algunas excepciones, ver Albu-Schäffer et al., 2007),

y, potencialmente, se puede aprender mucho del movimiento humano estudios (Gomi y Kawato, 1996; Franklin et al., 2003; Osu et al., 2004) y las propiedades del sistema musculoesquelético humano (Brown et al., 1999; Brown y Loeb, 1999; Loeb, 2001).

Otra característica fascinante del control motor humano es que la mayoría de las veces realizamos varias tareas en paralelo, por ejemplo, mantener el equilibrio sobre dos pies y agarrar un objeto. La teoría de la robótica ha desarrollado métodos de priorización jerárquica de tareas (Nakamura, 1991; Khatib et al., 2004; Sentis y Khatib, 2004; Arimoto et al., 2005; Peters et al., 2005b) que, en teoría, son bastante atractivos y capaces. En un trabajo reciente, Sentis y Khatib (Khatib et al., 2002; Khatib et al., 2004; Sentis y Khatib, 2004) demostraron que las condiciones bastante naturales Los comportamientos de mirada podrían generarse con jerarquías y controladores de espacio de tareas apropiados. Sin embargo, la mayoría de los Los métodos se basan en modelos precisos del robot y se convierten en bastante complejo cuando el robot está en contacto con el entorno, particularmente cuando las condiciones de contacto cambian (como en locomoción o manipulación de objetos). Existen bastante pocas evaluaciones experimentales del control jerárquico de tareas en sistemas complejos. sistemas robóticos y estudios de comportamiento con humanos han difícilmente abordaba problemas tan complicados.

COMPRENSIÓN Y APRENDIZAJE DE HABILIDADES MOTRICES

Es necesario comprender mucho más sobre cómo representar la habilidad motora. Generalmente existe la posibilidad de elegir si se debe realizar una tarea especial. coordenadas, coordenadas externas generales (por ejemplo, coordenadas cartesianas) o coordenadas internas (ángulo de articulación) son las más utilizadas. adecuado (Saltzman, 1979; Schaal et al., 1992). Las estrategias de control especiales pueden facilitar o dificultar las habilidades motoras (p. ej., Beek, 1989; Schaal et al., 1992). Existen algunas ideas sobre cómo generar representaciones genéricas de la habilidad motora (Wada y Kawato, 1995; Miyamoto y otros, 1996; Miyamoto y Kawato, 1998; Ijspeert et al., 2003), pero, hasta ahora, falta un enfoque genérico para la adquisición de habilidades.

Otro componente importante en la comprensión del motor. habilidades radica en representar el objetivo de la tarea, es decir, algún tipo de métrica que mide el logro de la tarea. Para algunas tareas, como alcanzar un objeto, esto es sencillo ya que la métrica de el éxito es simplemente la distancia de la mano al objeto.

Para otras tareas, por ejemplo, la locomoción bípeda, la tarea El objetivo es mucho más abstracto y no fácilmente cuantificable. Para locomoción bípeda, el objetivo principal de la tarea es no caerse, pero un objetivo de tarea secundaria es conservar energía, una tarea terciaria El objetivo de la tarea es reducir el desgaste del sistema motor y Otro objetivo de la tarea podría ser mantener el equilibrio y al mismo tiempo alcanzar una taza de café. El objetivo de equilibrarse no es fácilmente cuantificable: podríamos elegir la posición deseada del centro de gravedad, pero también una posición deseada del centro de gravedad. punto de momento cero (Kajita y Tani, 1996). Otros investigadores pueden afirmar que tales medidas no son adecuadas para la locomoción bípeda similar a la humana y recurrir a describir la locomoción bípeda en términos de una medida de estabilidad de la locomoción asociada. ciclo límite (McGeer, 1990; Collins et al., 2005). Esencialmente, No es fácil especificar criterios de optimización específicos de una tarea.

Si asumimos que tenemos una representación de tarea y una métrica para medir el éxito de la tarea, todavía no está claro cómo elegir comandos motores apropiados para realizar la tarea. A la vista de un diseñador humano existe una posibilidad, pero como se mencionó anteriormente, la Nueva Robótica requerirá robots que puedan reaccionar a entornos dinámicos, y es poco probable que los humanos Los diseñadores pueden prever todos los eventos posibles en los que se desarrollará un robot. expuesto a. Por lo tanto, los robots que aprenden serían muy deseables, una campo que se llama control del aprendizaje. Es útil seguir uno de los marcos más generales de control del aprendizaje tal como se desarrollaron originalmente a mediados del siglo XX en los campos de la teoría de la optimización, el control óptimo y, en particular, la programación dinámica (Bellman, 1957; Dyer y McRey Nolds, 1970). Aquí, el objetivo del control del aprendizaje se formalizó como la necesidad de adquirir una política de control dependiente de la tarea. que mapea el vector de estado valorado continuo x de un control sistema y su entorno, posiblemente en un tiempo dependiente manera, a un vector de control de valor continuo u :

$$u = x, t. \quad 1$$

El vector de parámetros contiene los parámetros específicos del problema en la política π que deben ser ajustados por el proceso de aprendizaje. sistema. Dado que el sistema controlado generalmente puede expresarse como una función no lineal

$$x' = f(x, u) \quad 2$$

De acuerdo con la teoría de sistemas dinámicos estándar (Strogatz, 1994), la dinámica combinada de sistemas y controladores resulta en

$$x' = f(x, t). \quad 3$$

Por lo tanto, aprender a controlar significa encontrar un (generalmente no lineal) función π que es adecuada para un determinado comportamiento deseado y sistema de movimiento.

Un enfoque general de las políticas de control del aprendizaje es el aprendizaje por refuerzo (Sutton y Barto, 1998; Schaal, 2002; Barto y Mahadevan, 2003). Desafortunadamente, el refuerzo El aprendizaje es una técnica bastante lenta, con tremendos problemas computacionales y teóricos a la hora de aplicarla.

Revista HFSP

a robots reales (Peters et al., 2003a; Peters et al., 2003b; Peters et al., 2005c). Alternativamente, uno puede optar por aplicar aprendiendo sólo algunas partes del problema de control, por ejemplo, como en Aprender los modelos internos que se necesitan en el feedforward. control. Estas tareas se pueden lograr con el aprendizaje supervisado. técnicas, que es computacional y prácticamente mucho más manejable (Atkeson et al., 1986; Schaal y Atkeson, 1994; Atkeson y otros, 1997a; Atkeson y otros, 1997b; Schal y otros, 2002; Peters y Schaal, 2006). Desafortunadamente, aprender aplicada a robots de apariencia humana se ha llevado a cabo sólo hasta cierto punto. bastante pequeña, y una gran cantidad de investigación tanto sobre aún queda por abordar el aspecto teórico y práctico del aprendizaje automático y la robótica (para una revisión, véase Schaal, 2002; Schaal, en prensa).

INVESTIGACIÓN DE INTERACCIÓN

La investigación sobre la interacción añade un componente interesante a la robótica, es decir, cómo coordinar dos sistemas de movimiento para cooperar en el mismo objetivo de la tarea. Por supuesto, esta cooperación no es limitado a una cooperación mecánica pero permite cualquier tipo de interacción, por ejemplo, lenguaje, gestos, etc. Interacción Research ha iniciado recientemente su propio campo de investigación y conferencias asociadas: interacción persona-robot (HRI). Para ilustrar la complejidad del HRI, podríamos definirlo tentativamente similar al término "interacción persona-computadora":

HRI es donde tanto humanos como robots participan en una experiencia de respuesta que afecta mutuamente. en técnico

En términos generales, tenemos (al menos) dos políticas de control acopladas, uno hecho de un humano, otro de un robot

El problema aquí es que HRI acopla al menos dos no lineales sistemas dinámicos. Uno de ellos, el robot, puede estar bastante bien comprendido. El otro, el humano, es menos comprendido, e incluso a riesgo de resultar perjudicado si HRI sale mal. En general, se entiende bien que la dinámica no lineal acoplada

Los sistemas pueden comportarse de forma predecible o impredecible, altamente manera compleja (Strogatz, 1994). Por lo tanto, la investigación debe ser bastante cuidadoso al diseñar métodos para HRI, manteniendo siempre Tenga en cuenta que los algoritmos simples que se entienden bien en El aislamiento puede causar daños cuando se acopla a varios sistemas. Es decir, las preocupaciones por la ética y la seguridad son muy importantes. en HRI, así como una sólida comprensión de la dinámica de acción y percepción humana, y qué estímulos o conductas podría desencadenar situaciones peligrosas para el ser humano, por ejemplo, convulsiones por estimulación perceptiva, reacciones emocionales o reacciones físicas inapropiadas.

IMITACIÓN DE MOVIMIENTOS Y ACTIVIDADES

El aprendizaje cultural y por imitación se encuentran entre los elementos más fascinantes de los seres humanos y, a menudo, se cree que son la piedra angular de cómo los humanos podrían desarrollar un nivel tan alto de inteligencia (cf. revisiones en Piaget, 1951; Tomasello et al., 1993; Meltzoff y Moore, 1994; Byrne y Russon, 1998; Rizzolatti y Arbib, 1998; Dautenhahn y Nehaniv, 2002). Durante más de 20 años, los robóticos han intentado añadir imitaciones.

aprendizaje por demostración, o aprendizaje por demostración, como se le llamaba inicialmente, al repertorio de aprendizaje de robots. La imitación de movimientos es familiar para todos por la experiencia cotidiana: un profesor demuestra un movimiento, e inmediatamente el estudiante es capaz de repetirlo aproximadamente. Desde el punto de vista de aprendizaje, la demostración del docente como punto de partida del el propio aprendizaje puede acelerar significativamente el aprendizaje proceso, ya que la imitación suele reducir drásticamente la cantidad de prueba y error que se necesita para lograr el movimiento objetivo proporcionando un buen ejemplo de un movimiento exitoso (Schaal, 1999). Por lo tanto, desde el punto de vista de la robótica, es importante comprender los principios, algoritmos y métricas que sirven a la imitación, desde la percepción visual del profesor hasta la emisión de órdenes motoras que mover las extremidades del estudiante.

La Figura 4 esboza los principales ingredientes de un concepto sistema de aprendizaje por imitación [para una revisión de muchos artículos relacionados, ver Schaal (1999)]. La información sensorial visual necesita ser analizado en información sobre objetos y su ubicación espacial en un sistema de coordenadas interno o externo; la organización representada está inspirada en gran medida en el dorsal (qué) y corriente ventral (dónde) como se descubre en neurocientíficos investigación (van Essen y Maunsell, 1983). Como resultado, algunos forma de información postural del movimiento del profesor y/o información tridimensional sobre el objeto manipulado (si se trata de un objeto) debe convertirse en disponible. Posteriormente, una de las principales cuestiones gira sobre cómo esa información puede convertirse en acción.

Para ello, la Fig. 4 alude al concepto de movimiento. primitivas, que ya se discutió anteriormente. En general, Pensamos en primitivas de movimiento para codificar temporal completo. comportamientos, como "agarrar una taza", "caminar", "un saque de tenis", etc. La Figura 4 supone que la acción percibida del profesor se asigna a un conjunto de primitivos existentes en una asimilación fase, también sugerido en Demir y Hayes (2002) y (Wolpert et al., presentado). Este proceso de mapeo también necesita resolver el problema de correspondencia relativo a un desajuste entre el cuerpo docente y el cuerpo estudiantil (Dautenhahn y Nehaniv, 2002). Posteriormente se ajustan las primitivas más adecuadas aprendiendo a mejorar las desempeño en una fase de acomodación. La figura 4 indica tal proceso resaltando las primitivas que mejor coinciden con anchos de línea crecientes. Si ninguna primitiva existente es buena coincide con el comportamiento observado, se debe crear una nueva primitiva. generado. Después de una fase inicial de imitación, la superación personal, por ejemplo, con la ayuda de un programa basado en refuerzos. criterio de evaluación del desempeño (Sutton y Barto, 1998), Puede refinar tanto las primitivas de movimiento como una etapa asumida. de generación de comandos del motor (ver más abajo) hasta alcanzar el nivel deseado. Se logra un nivel de rendimiento motor (p. ej., Peters et al., 2003a; Bentivegna et al., 2004a).

El aprendizaje por imitación requiere un alto nivel de competencia motora y perceptiva, algo que hasta ahora no se ha logrado en sistemas robóticos. Sin embargo, el campo de la imitación en

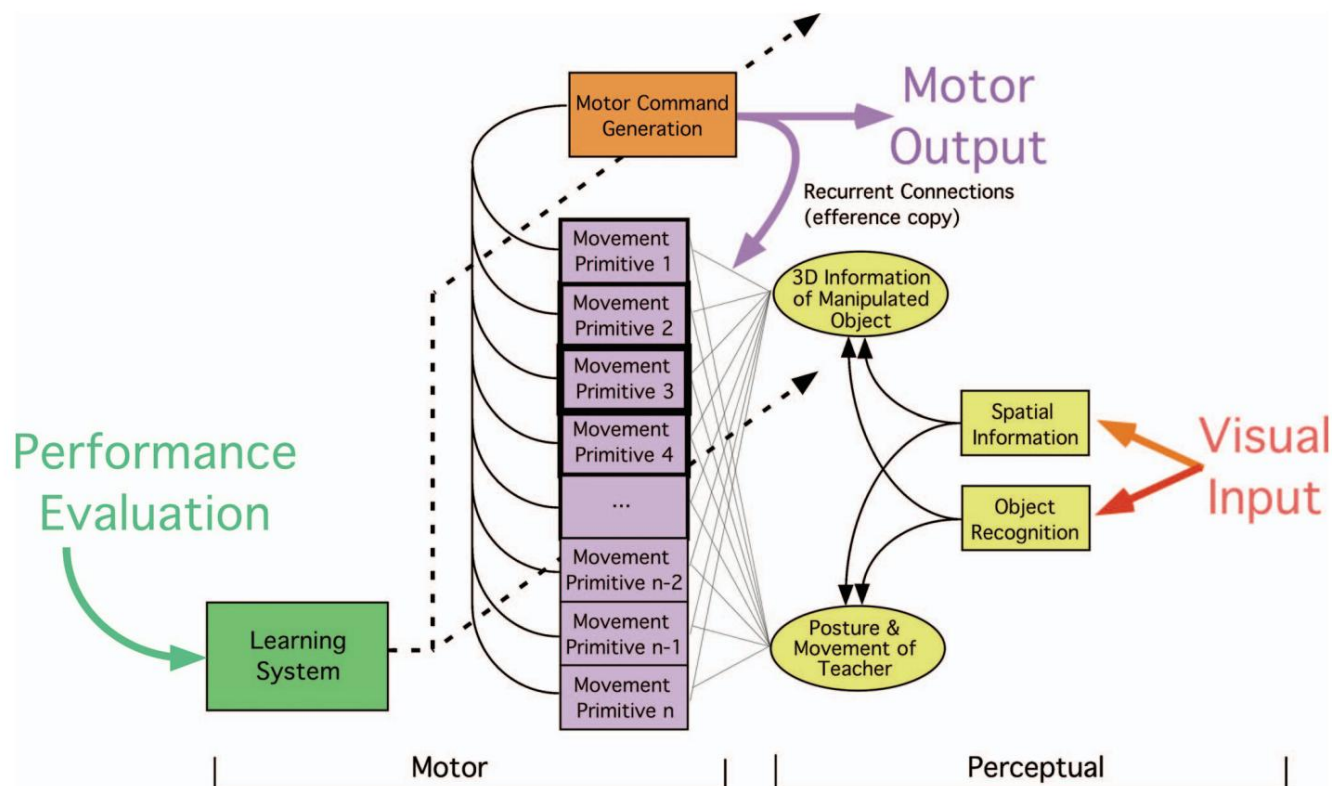


Figura 4. Bosquejo conceptual de un sistema de aprendizaje por imitación. El lado derecho de la figura contiene principalmente elementos perceptivos y indica cómo la información visual se transforma en información espacial y objetual. El lado izquierdo se centra en los elementos motores, ilustrando cómo un conjunto de primitivos de movimiento compete por un comportamiento demostrado. Los comandos del motor se generan a partir de la entrada del más apropiado primitivo. El aprendizaje puede ajustar tanto las primitivas de movimiento como el generador de comandos motores.

La robótica ha sido objeto de una gran cantidad de investigaciones en los últimos diez años. años, y existen excelentes reseñas y colecciones de artículos (p. ej., [Schal, 1999](#); [Mataric, 2000](#); [Dautenhahn y Nehaniv, 2002](#); [Schaal y col.; Arbib, 2006](#)).

RECONOCIMIENTO DE MOVIMIENTOS Y ACTIVIDADES

Comprender el movimiento y la actividad humanos será un componente importante de la Nueva Robótica, ya que los robots necesitarán inferir y reaccionar de forma autónoma ante el contexto de lo que sucede a su alrededor. Así, detectar humanos en el entorno y reconocer quiénes son y qué están haciendo

será crucial. Si bien la mayoría de las investigaciones relacionadas se han originado en visión por computadora (por ejemplo, para revisiones, ver [Gavrila, 1997](#); [Aggarwal y Cai, 1999](#)) y está más allá del alcance de este documento, desde el punto de vista de la generación de movimiento, un potencial La desventaja de estos enfoques es que las representaciones utilizadas para el reconocimiento son en su mayoría inapropiadas para el control de movimiento, ya que no se relacionan con la noción de articulaciones, músculos, torques articulares u objetivos de tareas. Dado que los robots en el La nueva robótica no sólo se utilizará para vigilancia, sino más bien necesitamos actuar sobre lo que percibieron, por ejemplo, como en la imitación de movimientos o en la fisioterapia, necesitamos orientación orientada a la acción. percepción en lugar de percepción aislada.

Impulsado por el descubrimiento de las "neuronas espejo" en neuro

investigación biológica, es decir, algunas neuronas que están situadas en el Interfaz de percepción y acción en humanos y monos.

([Rizzolatti y Arbib, 1998](#); [Schaal, 1999](#); [Frith y Wolpert, 2004](#); [Arbib, 2006](#)), y que de hecho parecen estar involucrados en Percepción orientada a la acción, se han iniciado varios proyectos de investigación en robótica y áreas relacionadas para desarrollar teorías y algoritmos correspondientes. Es decir, el motor modular. el enfoque de control de [Wolpert y Kawato \(1998\)](#), el enfoque de sistemas dinámicos de [Ijspeert et al. \(Ijspeert et al., 2003\)](#), y el enfoque estadístico de [Inamura et al. \(Inamura et al., 2004\)](#) y [Jenkins \(Jenkins, 2003\)](#) son métodos que realizan percepción orientada a la acción y pueden aplicarse a la robótica. Sin embargo, es necesario enfatizar que

La percepción en estos enfoques suele ser simplificada, es decir, la Los autores no utilizan entradas de vídeo sin procesar para el reconocimiento de movimientos, sino que equipan a sus sujetos con marcadores u otros significa reducir la complejidad del procesamiento visual. De este modo, Es necesario hacer mucho más para lograr una percepción orientada a la acción en entornos verdaderamente naturales.

LOGRO DE TAREAS COLABORATIVAS

En determinadas situaciones, será útil si varios robots, o Los robots y los humanos colaboran para lograr un objetivo particular. Hay dos tipos de colaboración: colaboración

Revista HFSP

por medio del contacto físico (p. ej., llevar juntos un objeto) y colaboración puramente mediante el intercambio de información (p. ej., como en el caso de múltiples robots que mapean un entorno). El Este último dominio ha recibido bastante atención en los últimos años debido a la competencia RoboCup, es decir, robots móviles que juegan fútbol en equipos (por ejemplo, ver [Bredenfeld et al., 2006](#)), y también hay una conferencia técnica sobre robots múltiples. sistemas (por ejemplo, ver [Parker et al., 2005](#)). Muchas de las técnicas desarrolladas en esta área de investigación tendrán relación con la Nueva Robótica, pero ampliando este artículo a este dominio Reduciría nuestro enfoque en la interdisciplinariedad centrada en el ser humano. investigar demasiado.

Colaboración física de robots (o robots y humanos)

En robótica se aborda en gran medida bajo el nombre de control de fuerzas, ya que la suma de fuerzas que actúan sobre un objeto manipulado conjuntamente es la más importante para el comportamiento del objeto. Un marco teóricamente muy atractivo para tal manipulación fue desarrollado por Khatib ([Khatib, 1987](#)), inicialmente con el objetivo de explicando cómo la fuerza podría ser la variable más crucial en Codificar tareas motoras (en contraste con la posición, la velocidad o la aceleración). En [Featherstone y Khatib \(1997\)](#) se realizó que el marco de Khatib sobre el control a nivel de tareas basado en la fuerza (también conocido como control espacial operativo) era muy adecuado para el logro de tareas colaborativas, ya que la formulación especial de Khatib evita la compleja interacción matemática entre los sistemas motores colaboradores, es decir, cada sistema puede contribuir individualmente con su contribución de fuerza sin tomar el en cuenta el estado combinado de todos los sistemas motores contribuyentes. La formulación de Khatib del control de tareas sigue siendo, por tanto, una Uno de los enfoques teóricos más atractivos para la generación de habilidades motoras robóticas, ya que combina la capacidad de control dócil, control jerárquico e incluso coordinación de múltiples robots. Como se mencionó anteriormente, el único inconveniente es que estas propiedades requieren modelos bastante precisos del robot sistema. Será interesante ver en trabajos futuros si Se puede demostrar que el control del motor humano funciona de acuerdo con principios similares a los sugeridos por el trabajo de Khatib, y algunos Se está trabajando en esta dirección ([Scholz y Schoner, 1999](#); [Todorov y Jordan, 2002](#); [Todorov, 2005](#)).

SEGURIDAD

Si bien este documento no abordará cuestiones técnicas de seguridad en la Nueva Robótica, es importante señalar que la seguridad será una preocupación importante y un obstáculo en el desarrollo de la Nueva Robótica. Es inevitable que haya Habrá accidentes entre humanos y robots en un entorno de robótica centrado en el ser humano. Es posible que el robot no se active tales cuestiones, pero ¿quién podrá evitar que los humanos empujar accidentalmente a los robots, los niños se suben a ellos, etc.? Las formas más poderosas de reducir el riesgo de lesiones es mediante un diseño de robot liviano y compatible (p. ej., [Zinn et al., 2004](#)), y adoptando comportamientos de recuperación similares a los que hacemos los humanos (por ejemplo, [Fujiwara et al., 2002](#)).

INVESTIGACIÓN DE COMPROMISO

Al observar un robot industrial ensamblando un automóvil, uno puede quedar fascinado por la tecnología por un momento, pero después de unos repeticiones, este interés se desvanece. La investigación sobre el compromiso intenta comprender lo que se necesita para mantener a los humanos interesados cuando interactúan con un robot, lo cual será crucial en la Nueva Robótica cuando los robots se conviertan en educadores, fisioterapeutas, asistentes personales o incluso mascotas. Investigación de compromiso es lo de menos de un tema de robótica original y mucho más Tiene sus raíces en la psicología y las ciencias cognitivas. En este papel, Por lo tanto, nos centraremos sólo en unos pocos temas de la investigación del compromiso que se relacionan más fuertemente con la investigación técnica. de robótica.

ATENCIÓN Y ATENCIÓN COMPARTIDA

Los movimientos oculares son cruciales en el comportamiento humano en al menos dos maneras. Primero, los utilizamos para cambiar el foco de nuestra atención hacia un objeto de interés, de manera que pueda ser inspeccionado con el región foveal de alta resolución de la retina, y en segundo lugar, usar nuestros ojos para informar a otros sobre objetos interesantes, es decir, Compartimos atención y provocamos compromiso. Además, el El sistema oculomotor humano tiene varios comportamientos de nivel inferior. que contribuyen a la estabilización de la información visual (el reflejo vestibulo-ocular, el reflejo optocinético, la persecución suave y vergencia, por ejemplo, ver [Shibata et al., 2001](#)). Finalmente, los movimientos oculares parecen ser un componente importante en la creación de secuencias motoras complejas ([Flanagan y Johansson, 2003](#); [Flanagan et al., 2006](#)), de modo que la generación de acciones secuenciales puede requerir la comprensión de los principios de la atención visual y planificación en el espacio visual.

Desde el punto de vista de la robótica, ha habido un buen montaje. del trabajo sobre la creación de comportamientos motores de visión de bajo nivel cabezas (por ejemplo, [Demiris et al., 1997](#); [Breazeal et al., 2001](#); [Shi bata et al., 2001](#); [Panerai et al., 2003](#); [Aryananda y Weber, 2004](#)). Sin embargo, hasta ahora no se ha logrado una implementación completa de todos los Los comportamientos oculomotores del sistema oculomotor humano son desaparecido. Mientras las cabezas de los robots estaban montadas en plataformas estáticas, a menudo no había mucha necesidad de un sistema motor ocular completo, pero si se supone que la cabeza debe estar en una plataforma móvil robot humanoide, se requerirán todos los reflejos de estabilización y comportamientos motores de nivel superior. No es que cualquiera de estos comportamientos por sí solos es un problema técnico, sino más bien la El desafío radica en la combinación y el arbitraje de todos los comportamientos y algunas habilidades de aprendizaje requeridas para afinar el comportamiento. parámetros de comportamiento ([Shibata et al., 2001](#)).

La atención visual con cabezas de visión de robots también se ha explorado ampliamente (p. ej., [Braun, 1994](#); [Driscoll et al., 1998](#); [Breazeal et al., 2001](#); [Shibata et al., 2001](#); [Vijayakumar y al., 2001](#)), pero sólo recientemente se ha realizado un estudio bastante completo El sistema de atención visual para aplicaciones técnicas se derivó del conocimiento de la neurobiología ([Koch y Ullman, 1985](#); [Itti y Koch, 2000a](#); [Itti y Koch, 2000b](#); [itti y Koch, 2001](#); [Itti et al., 2003](#)). Este trabajo se encuentra actualmente en su

manera de explorar cómo la intención (es decir, los sesgos relevantes de la tarea de arriba hacia abajo) pueden influir en la atención y la toma de decisiones (Navalpa kkam e Itti, 2005; Carmi e Itti, 2006).

Finalmente, la atención compartida, que es fundamental para el compromiso. investigación, ha comenzado a explorarse en algunos proyectos de robótica (Kozima e Ito, 1998; Scassellati, 1998; Scassellati, 2002).

Las capacidades necesarias para monitorear la atención incluyen la mirada. seguimiento, interpretación de posturas, reconocimiento de expresiones faciales, etc. (p. ej., Breazeal y Scassellati, 2002). Tomará un

Se necesita una cantidad significativa de investigación y desarrollo tecnológico hasta que dichos sistemas se comprendan bien, sean comparables en sus capacidades al desempeño humano y sean prácticos en su desempeño. entornos del mundo real.

MODELADO DE INTENCIÓN Y USUARIO

Una cuestión difícil y bastante inexplorada de la interacción entre humanos y robots es cómo extraer la intención y las preferencias del movimiento de un cuerpo. Si entenderíamos estas cuestiones, sería apropiado

Se podrían desarrollar protocolos de interacción y compromiso.

investigaciones que atraigan a usuarios individuales y tengan en cuenta sus inclinaciones individuales. Más bien pocas investigaciones

Se pueden encontrar proyectos relacionados con estas preguntas. Un primero El siguiente paso podría ser comprender el movimiento y la actividad humana en términos de funciones de costos, es decir, asociar un costo particular funcionar con un comportamiento particular. Aprendizaje reforzado genera políticas de control basadas en dichas funciones de costos y Deducir la función de costos de una política determinada (es decir, el comportamiento) podría denominarse aprendizaje por refuerzo inverso (Ng y Russell, 2000). Alternativamente, se pueden recopilar estadísticas de comportamiento a partir del comportamiento observado, que posteriormente caracterizan ciertas preferencias de usuario y de movimiento (Bentivegna et al. otros, 2004b; Billard et al., 2004). Se necesita mucho trabajo de investigación Por hacer para encontrar enfoques viables para el tema y la intención. y modelado de usuarios, que esencialmente intenta acercarse a la tema de una "teoría de la mente" en formas algorítmicas (gallés y Goldman, 1998; Scassellati, 2002; Wolpert et al., 2003).

MOTIVACIÓN Y EMOCIONES

Estrechamente relacionada con la intención y el modelado del usuario está la cuestión de cómo entender la motivación y las emociones de los humanos en un

forma automática y, por supuesto, cómo crear comportamientos de robot en la Nueva Robótica que se relacionan con aquellas características de la

personalidad humana. Hasta el momento, existen investigaciones empíricas y exploratorias trabajar en la comunidad de robótica sobre este tema (por ejemplo, Breazeal y Scassellati, 2002; Kanda y otros, 2004; Coradeschi et al.,

2006), generalmente confrontando a sujetos humanos con algunos forma de robot de apariencia humana y estudiando su reacción de acuerdo con algunas métricas psicológicas. Un nuevo enfoque interesante es investigar las bases neurocientíficas de

motivación y emociones, investigadas en el contexto de la formación y el compromiso. Investigación sobre formación y compromiso

Parte de la hipótesis de que el propio aprendizaje motor puede generar recompensas internas. En concreto, se propone que el

El sistema nervioso calcula la tasa de aprendizaje de habilidades motoras.

que sirve como recompensa interna y se suma a los términos de recompensa

externos. Según un modelo preliminar (Daw y Touretzky, 2002; Schweihof y Doya, 2003; Schweig hofer et al., 2004), la

motivación para aprender dependerá de la equilibrio entre éxitos, fracasos y recompensas externas. En

En particular, la dificultad del movimiento observado por aprender es crucial. Si es demasiado fácil o demasiado difícil, el ritmo de aprendizaje pronto será cero. Por lo tanto, sólo moderada y decreciente

Los errores de aprendizaje producirán una gran ganancia en la retroalimentación positiva.

bucle que maximizará la motivación para aprender. Estas intuiciones pueden formalizarse en programas de entrenamiento y pueden conducir a

métodos que mantienen de manera óptima a los estudiantes interesados para un aprendizaje rápido. Una metodología de investigación similar podría ser aplicable a otras situaciones en las que la motivación y las emociones humanas

desempeñan papeles importantes.

CONCLUSIONES

Esta perspectiva destacó una investigación interdisciplinaria programa que podría allanar el camino hacia una Nueva Robótica.

La visión es que, en algún momento en el futuro cercano, los robots estar omnipresente entre nosotros y ayudarnos a cumplir tareas de manera sociedad cada vez más compleja, una sociedad cada vez más enfrentados a un envejecimiento de la población, problemas educativos, desastres, enfermedades, etc. Para funcionar entre nosotros, los robots de la Nueva Robótica necesitarán tener mucho más

habilidades similares a las humanas en sus comportamientos motores, y También se les exigirá que tengan conductas sociales apropiadas. De este modo, La investigación en robótica debe adoptar una nueva perspectiva interdisciplinaria. programa que abarca desde temas técnicos tradicionales de control hasta la neurociencia, la psicología, las ciencias cognitivas y la ética. Este documento se centró en incorporar, de forma no exhaustiva, manera: cierta estructura para los posibles temas de investigación en el Nueva Robótica. Algunos de estos temas, por ejemplo, los mencionados bajo Investigación Acción, ya cuentan con una base científica más sólida fundación y están en camino de realizar estudios piloto sobre robots reales. Otros temas, en particular los enumerados en la investigación sobre el compromiso, están más en su infancia y es la

tarea de investigación para descubrir cuáles son las preguntas adecuadas para preguntar y qué enfoques podrían ser prometedores. En algunos En cierto sentido, la Nueva Robótica no es más que el viejo sueño de la inteligencia artificial de crear un sistema artificial con características similares. capacidades que las de los humanos. Es sólo que los medios y los enfoques sobre este tema han cambiado significativamente.

de las ideas clásicas del razonamiento simbólico y, en el a raíz de la mejora de la tecnología informática y de los conocimientos sobre la cerebro humano, en lugar de seguir métodos de aprendizaje estadístico, neurociencia computacional y psicología computacional.

También es importante que las ambiciones de la Nueva Robótica son reducidos: realmente pueden centrarse en las necesidades de la sociedad y hacer progreso en áreas problemáticas bien definidas, por ejemplo, física robótica Terapia o educación robótica de niños con necesidades especiales. (por ejemplo, niños autistas), en lugar de intentar crear el sistema robótico omnipotencial para todos los problemas. En muchos países, Las agencias de investigación han comenzado a financiar las plántulas de

Nueva Robótica, y será emocionante presenciar el desarrollo de este nuevo campo durante la próxima década.

EXPRESIONES DE GRATITUD

Esta investigación fue financiada en parte por las subvenciones de la National Science Foundation Nos. ECS-0325383, IIS-0312802, IIS 0082995, ECS-0326095, ANI-0224419, NASA Grant No. AC#98-516, una subvención de AFOSR para Control Inteligente, el Proyecto Cerebro Dinámico ERATO Kawato financiado por la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología y los Laboratorios de Neurociencia Computacional ATR.

REFERENCIAS

Aggarwal, JK y Cai, Q (1999). "Análisis del movimiento humano: una revisión". Computadora. Vis. Comprensión de la imagen. 73, 428–440.

Albu-Schäffer, A, Ott, C y Hirzinger, G (2007). "Un marco de control unificado basado en pasividad para el control de posición, par e impedancia de robots de articulaciones flexibles". En t. J. Robot. Res. 26, 23–39.

An, CH, Atkeson, CG y Hollerbach, JM (1988). Control basado en modelos de un robot manipulador, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, M (1995a). El manual de teoría del cerebro y redes neuronales, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, MA (1995b). "Teoría de esquemas". En The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Arbib, MA (ed), págs. 830–834, MIT Press, Cambridge, MA.

Arbib, MA (2006). Acción al lenguaje a través del sistema de neuronas espejo, Prensa de la Universidad de Cambridge, Cambridge, MA.

Arimoto, S, Sekimoto, M, Hashiguchi, H y Ozawa, R (2005). "Resolución natural de la mala postura de la cinemática inversa para robots redundantes: un desafío al problema de los grados de libertad de Bernstein". Adv. Robar. 19, 401–434.

Aryananda, L y Weber, J (2004). "MERTZ: la búsqueda de un robot con cabeza humanoide de visión activa, robusto y escalable". En, volumen 2, págs. 513–532.

Atkeson, CA, Aboaf, EW, McIntyre, J y Reinkensmeyer, DJ (1986). "Aprendizaje de robots basado en modelos". Cuarto Simposio Internacional sobre Investigación en Robótica, 2318–2330.

Atkeson, CG, Hale, J, Kawato, M, Kotosaka, S, Pollick, F, Riley, M, Schaal, S, Shibata, S, Tevatia, G y Ude, A (2000). "Usar robots humanoides para estudiar el comportamiento humano". Intel IEEE. Sistema. 15, 46–56.

Atkeson, CG, Moore, AW y Schaal, S (1997a). "Ponderado localmente aprendiendo." Artif. Intel. Apocalipsis 11, 11–73.

Atkeson, CG, Moore, AW y Schaal, S (1997b). "Aprendizaje ponderado localmente para el control". Artif. Intel. Apocalipsis 11, 75–113.

Barto, AG y Mahadevan, S (2003). "Avances recientes en el aprendizaje por refuerzo jerárquico". Evento discreto Dyn. Sistema. 13, 341–379.

Beek, PJ (1989). Dinámica de malabarismo, Free University Press, Ámsterdam.

Bellman, R (1957). Programación dinámica, Universidad de Princeton Press, Princeton, Nueva Jersey.

Bentivegna, DC, Atkeson, CA y Cheng, G (2004a). "Tareas de aprendizaje a partir de la observación y la práctica". Robar. Auton. Sistema. 47, 163–169.

Bentivegna, DC, Cheng, G y Atkeson, CG (2004b). "Aprender de la observación y de la práctica utilizando primitivos de comportamiento". XI Simposio Internacional sobre Investigación en Robótica (ISRR2003), Springer, Ciena, Italia.

Billard, A, Epars, Y, Calinon, S, Cheng, G y Schaal, S (2004). "Descubriendo estrategias óptimas de imitación". Robar. Auton. Sistema. 47, 68–77.

Braun, J (1994). "Búsqueda visual entre elementos de diferente relevancia: La eliminación de la atención visual imita una lesión en el área extraestriada V4". J. Neurociencias. 14, 554–567.

Breazeal, C, Edsinger, A, Fitzpatrick, P y Scassellati, B (2001). "Visión activa para robots sociales". Traducción IEEE. Sistema. Hombre Cibernético. 31, 443–453.

Breazeal, C y Scassellati, B (2002). "Robots que imitan a los humanos". Tendencias Cogn. Ciencia. 6, 481–487.

Bredenfeld, A, Jacoff, A, Noda, I y Takahashi, Y (2006). Robocup 2005: IX Copa Mundial de Fútbol de Robots, Springer, Nueva York.

Brock, O, Fagg, AH, Grupen, R, Platt, R, Rosenstein, M y Sweeney, J (2005). "Un marco para el aprendizaje y el control en robots humanoides inteligentes". En t. J. Robótica Humanoide 2, 301–336.

Brown, IE, Cheng, EJ y Loeb, GE (1999). "Propiedades medidas y modeladas del músculo esquelético de mamíferos. II. Los efectos de la frecuencia del estímulo en las relaciones fuerza-longitud y fuerza-velocidad". J. Res. muscular. Móvil celular. 20, 627–643.

Brown, IE y Loeb, GE (1999). "Propiedades medidas y modeladas del músculo esquelético de mamíferos. I. Los efectos de la potenciación post-activación sobre el curso del tiempo y las dependencias de la velocidad de la producción de fuerza". J. Res. muscular. Móvil celular. 20, 443–456.

Bullock, D y Grossberg, S (1988). "Dinámica neuronal de los movimientos planificados del brazo: invariantes emergentes y propiedades de precisión de velocidad durante la formación de la trayectoria". Psicólogo. Apocalipsis 95, 49–90.

Burridge, RR, Rizzi, AA y Koditschek, DE (1999). "Composición secuencial de comportamientos de robots dinámicamente diestros". En t. J. Robot. Res. 18, 534–555.

Byrne, RW y Russon, AE (1998). "Aprendizaje por imitación: una enfoque jerárquico". Comportamiento. Ciencia del cerebro. 21, 667–684; discusión 684–721.

Carmi, R e Itti, L (2006). "Causas visuales versus correlatos de selección atencional en escenas dinámicas". Visión Res. 46, 4333–4345.

Collins, S, Ruina, A, Tedrake, R y Wisse, M (2005). "Robots bípedos eficientes basados en andadores pasivo-dinámicos". Ciencia 307, 1082–1085.

Coradeschi, S, Ishiguro, H, Asada, M, Shapiro, SC, Thielscher, M, Breazeal, C, Mataric, MJ e Ishida, H (2006). "Robots inspirados en humanos". Intel IEEE. Sistema. 21, 74–85.

Dautenhahn, K y Nehaniv, CL, (eds) (2002). Imitación en animales y Artefactos, MIT Press, Cambridge, MA.

Daw, ND y Touretzky, DS (2002). "Predicción de recompensa a largo plazo en T. D. modelos del sistema de dopamina". Computación neuronal. 14, 2567–2583.

Demiris, J y Hayes, G (2002). "La imitación como proceso de doble ruta con componentes predictivos y de aprendizaje. Un modelo computacional biológicamente plausible". En Imitation in Animals and Artificats, Dautenhahn, K y Nehaniv, CL, (eds), págs. 327–361, MIT Press, Cambridge, MA.

Demiris, J, Rougeaux, S, Hayes, GM, Berthouze, L y Kuniyoshi, Y (1997). "Imitación diferida de los movimientos de la cabeza humana mediante una cabeza con visión estéreo activa". Taller internacional IEEE sobre comunicación humana entre robots, Sendai, Japón.

Doya, K, Samejima, K, Katagiri, K y Kawato, M (2002). "Aprendizaje por refuerzo basado en múltiples modelos". Computación neuronal. 14, 1347–1369.

Driscoll, J, Peters, R y Cave, K (1998). "Una red de atención visual para un robot humanoide". Proc. Conferencia internacional IEEE/RSJ sobre robots y sistemas inteligentes (IROS-98).

Dyer, P y Reynolds, SR (1970). La Computación y Teoría del Control Óptimo, Académica.

Featherstone, R y Khatib, O (1997). "Independencia de carga de la inversa dinámicamente consistente de la matriz jacobiana". En t. J. Robot. Res. 16, 168–170.

Flanagan, JR, Bowman, MC y Johansson, RS (2006). "Control estrategias en tareas de manipulación de objetos". actual. Opinión. Neurobiol. 16, 650–659.

Flanagan, JR y Johansson, RS (2003). "Planes de acción utilizados en acción. observación." Naturaleza (Londres) 424, 769–771.

Franklin, DW, Osu, R, Burdet, E, Kawato, M y Milner, TE (2003). "Adaptación a dinámicas estables e inestables lograda mediante control de impedancia combinado y modelo de dinámica inversa". J. Neurofisiol. 90, 3270–3282.

Frith, CD y Wolpert, DM (2004). La neurociencia de lo social Interacción: decodificar, imitar e influir en las acciones de los demás, The Royal Society, Oxford University Press, Oxford.

Fujiwara, K, Kanehiro, F, Kajita, S, Kaneko, K, Yokoi, K y Hirukawa, H (2002). UKEMI: control de movimiento de caída para minimizar el daño al robot humanoide bípedo. En, vol 3, págs. 2521–2526.

Gallese, V y Goldman, A (1998). "Las neuronas espejo y la teoría de la simulación de la lectura de la mente". Tendencias Cogn. Ciencia. 2, 493–501.

Gavrila, DM (1997). "El análisis visual de los movimientos humanos: una encuesta". Computadora. Vis. Comprensión de la imagen. 73, 82–98.

Gomi, H y Kawato, M (1996). "Hipótesis de control del punto de equilibrio

- examinado midiendo la rigidez del brazo durante el movimiento multiarticular". *Ciencia* 272, 117–220.
- Haruno, M, Wolpert, DM y Kawato, M (2001). "Modelo de mosaico para el aprendizaje y control sensoriomotor". *Computación neuronal*. 13, 2201–2220.
- Ijspeert, A, Nakanishi, J y Schaal, S (2003). "Aprendizaje de paisajes atractores para aprender primitivos motores". En *Advances in Neural Information Processing Systems* 15, Becker, S, Thrun, S y Obermayer, K, (eds), págs. 1547–1554, MIT Press, Cambridge MA.
- Inamura, T, Iwaki, T, Tanie, H y Nakamura, Y (2004). "Surgimiento de símbolos encarnados basado en la teoría de la mimesis". En *t. J. Robot. Res.* 23, 363–377.
- Itti, L, Dhavale, N y Pighin, F (2003). "Animación realista de ojos y cabeza de avatar utilizando un modelo neurobiológico de atención visual". *Actas del 48º Simposio Internacional Anual de SPIE sobre Ciencia y Tecnología Ópticas*, 64–78.
- Itti, L y Koch, C (2000a). "Una comparación de estrategias de combinación de características para sistemas de atención visual basados en prominencia". *Actas de SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV (HVEI99)*, 3644, 473–482.
- Itti, L y Koch, C (2000b). "Un mecanismo de búsqueda basado en prominencia para cambios de atención visual abiertos y encubiertos". *Visión Res.* 40, 1489–1506.
- Itti, L y Koch, C (2001). "Modelado computacional de la atención visual". *Nat. Rev. Neurociencias*. 2, 194–203.
- Jenkins, jefe (2003). "Derivación de habilidades basada en datos para agentes humanoides autónomos". Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad del Sur de California, Los Ángeles.
- Johansson, G (1973). "Percepción visual del movimiento biológico y un modelo para su análisis". *Percepción. Psicofísica*. 14, 201–211.
- Kajita, S y Tani, K (1996). "Estudio experimental de la marcha dinámica bípeda". *Sistema de control IEEE. revista* 16, 13–19.
- Kanda, T, Ishiguro, H, Imai, M y Ono, T (2004). "Desarrollo y evaluación de robots humanoides interactivos". *Proc. IEEE* 92, 1839–1850.
- Kawato, M (1999). "Modelos internos para el control motor y la planificación de trayectorias". *actual. Opinión. Neurobiol.* 9, 718–727.
- Khatib, O (1987). "Un enfoque unido para el control de movimiento y fuerza de manipuladores de robots: la formulación del espacio operativo". En *t. J. Robot. Res.* 31, 43–53.
- Khatib, O, Brock, O, Chang, K, Conti, F, Ruspini, D y Sentis, L (2002). "Robótica y simulación interactiva". *Comunitario. ACC X*, 46–51.
- Khatib, O, Sentis, L, Park, J y Warrent, J (2004). "Comportamiento dinámico de todo el cuerpo y control de robots con apariencia humana". En *t. J. Robot humanoide*. 1, 1–15.
- Koch, C y Ullman, S (1985). "Cambios en la atención visual selectiva: hacia los circuitos neuronales subyacentes". *Tarear. Neurobiol.* 4, 219–227.
- Kozima, H e Ito, A (1998). Un enfoque basado en la atención para la adquisición de símbolos. En, págs. 852–856.
- Loeb, GE (2001). "Aprender de la médula espinal". *J. Physiol.* 533, 111–117.
- Mataric, M (1998). "La robótica basada en el comportamiento como herramienta de síntesis del comportamiento artificial y análisis del comportamiento natural". *Tendencias Cogn. Ciencia*. 2, 82–86.
- Mataric, M (2000). "Conseguir que los humanoides se muevan e imiten". *Intel IEEE. Sistema*. 15, 18–24.
- McGeer, T (1990). "Caminar dinámico pasivo". En *t. J. Robot. Res.* 9, 633–643.
- Meltzoff, AN y Moore, MK (1994). "Imitación, memoria y representación de personas". *Comportamiento infantil. Desarrollo*. 17, 83–99.
- Menzel, P y D'Alusio, F (2000). *Robosapiens: evolución de un nuevo Especies*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Miall, RC y Wolpert, DM (1996). "Modelos avanzados para fisiológicos. control del motor." *Redes neuronales* 9, 1265–1285.
- Miyamoto, H y Kawato, M (1998). "Un robot de aprendizaje de saque y swing de tenis basado en la teoría bidireccional". *Redes neuronales* 11, 1331–1344.
- Miyamoto, H, Schaal, S, Gandolfo, F, Koike, Y, Osu, R, Nakano, E, Wada, Y y Kawato, M (1996). "Un robot de aprendizaje Kendama basado en la teoría bidireccional". *Redes neuronales* 9, 1281–1302.
- Nakamura, Y (1991). *Robótica avanzada: redundancia y optimización*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Nakanishi, J, Mistry, M y Schaal, S (presentado). "Control de dinámica inversa con base flotante y restricciones". Congreso Internacional de Robótica y Automatización (ICRA2007).
- Narendra, KS y Annaswamy, AM (2005). *Sistemas adaptativos estables*, Dover, Mineola, Nueva York.
- Navalpakkam, V e Itti, L (2005). "Modelar la influencia de la tarea en atención." *Visión Res.* 45, 205–231.
- Ng, AY y Russell, S (2000). "Algoritmos para el aprendizaje por refuerzo inverso". *Actas de la Decimoseptima Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático (ICML 2000)*, Stanford, CA.
- Osu, R, Kamimura, N, Iwasaki, H, Nakano, E, Harris, CM, Wada, Y y Kawato, M (2004). "Control de impedancia óptimo para la realización de tareas en presencia de ruido dependiente de la señal". *J. Neurofisiol.* 92, 1199.
- Panerai, F, Metta, G y Sandini, G (2003). "Aprendizaje de reflejos de estabilización visual en robots con ojos en movimiento". *Neurocomputación* 48, 16.
- Parker, LE, Schneider, FE y Schultz, AC (2005). "Sistemas multirobot: de enjambres a autómatas inteligentes". vol. III, *Actas del Taller internacional de 2005 sobre sistemas multirobot*, Springer, Dordrecht.
- Peters, J, Mistry, M, Udwadia, FE, Cory, R, Nakanishi, J y Schaal, S (2005a). "Un marco unificador para el control de sistemas robóticos". Conferencia internacional IEEE sobre robots y sistemas inteligentes (IROS 2005), Edmonton, Alberta, Canadá, 2 al 6 de agosto de 1824 a 1831.
- Peters, J, Mistry, M, Udwadia, FE y Schaal, S (2005b). "Una nueva metodología para el diseño de control de robots". Quinta Conferencia Internacional ASME sobre Sistemas Multicuerpo, Dinámica No Lineal y Control (MSNDC 2005), Long Beach, CA, 24 al 28 de septiembre.
- Peters, J y Schaal, S (2006). "Aprender el control del espacio operativo". En *Robótica: ciencia y sistemas (RSS 2006)*, Burgard, W, Sukhatme, GS y Schaal, S, (eds), MIT Press, Cambridge, MA.
- Peters, J, Vijayakumar, S y Schaal, S (2003a). "Aprendizaje por refuerzo para robótica humanoide". *Humanoids 2003, Tercera Conferencia Internacional IEEE-RAS sobre Robots Humanoides*, Karlsruhe, Alemania, 29 y 30 de septiembre.
- Peters, J, Vijayakumar, S y Schaal, S (2003b). "Ampliación de los paradigmas de aprendizaje por refuerzo para el aprendizaje motor". *Actas del décimo simposio conjunto sobre computación neuronal (JSNC 2003)*, Irvine, CA, mayo.
- Peters, J, Vijayakumar, S y Schaal, S (2005c). "Actor-crítico natural". Gama, J, Camacho, R, Brazdil, P, Jorge, A y Torgo, L (eds), *Actas de la 16ª Conferencia Europea sobre Aprendizaje Automático (ECML 2005)*, vol 3720, Springer, Porto, Portugal, 3 de octubre –7, págs. 280–291.
- Piaget, J (1951). *Juego, sueños e imitación en la infancia*, Norton, New York.
- Righetti, L e Ijspeert, A (2006). "Metodologías de diseño para generadores de patrones centrales: una aplicación a humanoides rastrosos". *Actas de robótica: ciencia y sistemas*, MIT Press, Filadelfia.
- Rizzolatti, G y Arbib, MA (1998). "El lenguaje a nuestro alcance". *Tendencias Neurociencias*. 21, 188–194.
- Robins, B, Dautenhahn, K, Boekhorst, R y Billard, A (2005). "Asistentes robóticos en la terapia y educación de niños con autismo: ¿Puede un pequeño robot humanoide ayudar a fomentar las habilidades de interacción social?" *Acceso Universal en la Sociedad de la Información* 4.
- Russell, SJ y Norvig, P (1995). *Inteligencia artificial: un enfoque moderno*, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.
- Sabes, PN (2000). "La planificación y control de los movimientos de alcance". *actual. Opinión. Neurobiol.* 10, 740–746.
- Saltzman, EL (1979). "Niveles de representación sensoriomotora". *J. Matemáticas. Psicólogo*. 20, 91–163.
- Scassellati, B (1998). "Imitación y mecanismos de atención conjunta: A. estructura de desarrollo para desarrollar habilidades sociales en un robot humanoide". En *Computación para metáforas, analogías y agentes*, Nehaniv, C. L, págs. 176–195, Springer, Nueva York.
- Scassellati, B (2002). "Teoría de la mente para un robot humanoide". *Auton. Robar*. 12.
- Schal, S (1999). "¿Es el aprendizaje por imitación el camino hacia los robots humanoides?" *Tendencias Cogn. Ciencia*. 3, 233–242.

Revista HFSP

Schaal, S (2002) "Aprendizaje del control de robots". En The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, 2ª ed., Arbib, M. A, MIT Press, Cambridge, MA, págs.

Schaal, S, Sistemas dinámicos: cerebro, cuerpo e imitación. En acción contra el lenguaje a través del sistema de neuronas espejo (en prensa).

Schaal, S y Atkeson, CG (1994). "Aprendizaje de robots mediante regresión no paramétrica". Actas de la Conferencia Internacional sobre Robots y Sistemas Inteligentes (IROS'94). Munich, Alemania, págs. 478–485.

Schaal, S, Atkeson, CG y Botros, S (1992). "¿Qué se debe aprender?" Actas del séptimo taller de Yale sobre sistemas de aprendizaje y adaptación, New Haven, CT, 20 al 22 de mayo, págs.

Schaal, S, Atkeson, CG y Vijayakumar, S (2002). "Técnicas escalables a partir de estadísticas no paramétricas para el aprendizaje de robots en tiempo real". Aplica. Intel. 17, 49–60.

Schaal, S, Ijspeert, A y Billard, A (2003). "Enfoques computacionales para el aprendizaje motor por imitación". Filos. Trans. R. Soc. Londres, ser. B 358, 537–547.

Schaal, S, Peters, J, Nakanishi, J e Ijspeert, A. (2004). "Aprendizaje de las primitivas del movimiento". Simposio Internacional sobre Investigación en Robótica (ISRR2003), Springer, Cienza, Italia.

Schaal, S y Schweighofer, N (2005). "Control motor computacional en humanos y robots". actual. Opinión. Neurobiol. 15, 675–682.

Schmidt, RA (1988). "Control motor y aprendizaje". Cinética humana, Champaign, IL.

Scholz, JP y Schoner, G (1999). "El concepto de variedad inconstruida: identificación de variables de control para una tarea funcional". Exp. Res. cerebral. 126, 289–306.

Schweighofer, N y Doya, K (2003). "Metaaprendizaje en refuerzo aprendiendo." Redes neuronales 16, 5–9.

Schweighofer, N, Doya, K y Kuroda, S (2004). "Neuromodulación aminérgica cerebelosa: hacia una comprensión funcional". Res. cerebral. Rev. (en prensa).

Sciavicco, L y Siciliano, B (1996). Modelado y control de robots manipuladores, MacGraw-Hill, Nueva York.

Sciavicco, L y Siciliano, B (2000). Modelado y control de robots manipuladores, Springer, Londres.

Sentis, L y Khatib, O (2004). "Control orientado a tareas de robots humanoides mediante priorización". Conferencia internacional IEEE-RAS/RSJ sobre robots humanoides, Santa Mónica, CA, 10 al 12 de noviembre.

Shadmehr, R y Wise, SP (2005). "La neurobiología computacional de alcanzar y señalar: una base para el aprendizaje motor". MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Shibata, T, Vijayakumar, S, Conradt, J y Schaal, S (2001). "Control oculomotor biomimético". Comportamiento adaptativo 9, 189–207.

Slotine, JJ. E y Li, W (1991). Control no lineal aplicado, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.

Strogatz, SH (1994). "Dinámica no lineal y caos: con aplicaciones a la física, la biología, la química y la ingeniería". Addison-Wesley, Reading, MA.

Sutton, RS y Barto, AG (1998). Aprendizaje reforzado. Una introducción. Prensa del MIT, Cambridge.

Taub, E y Wolf, SL (1997). "Técnicas inducidas por restricciones para facilitar el uso de las extremidades superiores en pacientes con accidente cerebrovascular". Temas de rehabilitación de accidentes cerebrovasculares 3, 38–61.

Todorov, E (2005). "Métodos estocásticos de control y estimación óptimos adaptados a las características del ruido del sistema sensoriomotor". Computación neuronal. 17, 1084-1108.

Todorov, E y Jordan, MI (2002). "El control óptimo de la retroalimentación como teoría de la coordinación motora". Nat. Neurociencias. 5, 1226-1235.

Tomasello, M, Savage-Rumbaugh, S y Kruger, AC (1993). "Aprendizaje imitativo de acciones sobre objetos por parte de niños, chimpancés y chimpancés inculturados". Chim. Oggi 64, 1688-1705. van der Lee, JH, Wagenaar, RC, Lankhorst, GJ, Vogelaaar, TW, Deville, WL y Bouter, LM (1999). "Uso forzado de la extremidad superior en pacientes con accidente cerebrovascular crónico: resultados de un ensayo clínico aleatorizado simple ciego". Accidente cerebrovascular 30, 2369–2375.

van Essen, DC y Maunsell, JM. R (1983). "Organización jerárquica y flujos funcionales en la corteza visual". Tendencias Neurociencias. 6, 370–375.

Vijayakumar, S, Conradt, J, Shibata, T y Schaal, S (2001). "Atención visual manifiesta para un robot humanoide". Conferencia internacional IEEE sobre robots y sistemas inteligentes (IROS 2001).

Vijayakumar, S, D'Souza, A y Schaal, S (2005). "Aprendizaje incremental en línea en altas dimensiones". Computación neuronal. 17, 1–33.

Vijayakumar, S y Schaal, S (2000). "Aprendizaje en tiempo real en humanoides: un desafío para la escalabilidad de los algoritmos en línea". Humanoids 2000, Primera Conferencia Internacional IEEE-RAS sobre Robots Humanoides. Actas en CD, Cambridge, MA.

Viviani, P, Baud-Bovy, G y Redolfi, M (1997). "Percepción y seguimiento de estímulos cinestésicos: evidencia adicional de interacciones motor-perceptivas". J. Exp. Psicólogo. Tararear. Percepción. Llevar a cabo. 23, 1232-1252.

Viviani, P y Schneider, R (1991). "Un estudio de desarrollo de la relación entre geometría y cinemática en los movimientos de dibujo". J. Exp. Psicólogo. Tararear. Percepción. Llevar a cabo. 17, 198–218.

Wada, Y y Kawato, M (1995). "Una teoría de la escritura cursiva basada en el principio de minimización". Biol. Cibern. 73, 3–13.

Viena, N (1948). Cibernética, Wiley, Nueva York.

Wolf, SL y Blanton, S (1999). "Una aplicación de la terapia de movimiento inducida por restricción de las extremidades superiores en un paciente con accidente cerebrovascular subagudo". Física. El r. 79, 847–953.

Wolpert, DM, Doya, K y Kawato, M (2003). "Un marco computacional unificador para el control motor y la interacción social". Filos. Trans. r. Soc. Londres, ser. B 358, 593–602.

Wolpert, DM, Doya, K y Kawato, M (presentado) "Un unificador Marco computacional para el control motor y la interacción social". Filos. Trans. R. Soc. Londres, ser. B.

Wolpert, DM y Kawato, M (1998). "Múltiples modelos emparejados hacia adelante e inverso para el control de motores". Redes neuronales 11, 1317-1329.

Zinn, M, Khatib, O, Roth, B y Salisbury, JK (2004). "Ir a lo seguro [robots amigables con los humanos]". Robot. Automático. revista 11, 12-21.