

Aplicación de teoría de la información para el modelado y cuantificación de la interacción persona-robot

Alberto Jardón, Martín F. Stoelen, Virginia Fernández, Juan G. Victores,
Santiago Martínez de la Casa, Carlos Balaguer, Fabio Bonsignorio
RoboticsLab
Universidad Carlos III de
Madrid (UC3M), Spain
ajardon@ing.uc3m.es

Resumen

La interacción humano-robot (HRI) en robótica asistencial tiene un varias características importantes que la distingue de otras formas de interacción. Esto incluye la necesidad de gran flexibilidad, seguridad y confianza en el control del sistema robótico. Interpretar el sistema como un binomio humano-robot, con el usuario y el robot actuando dentro de un bucle de control cerrado, puede ser beneficioso para comprender y mejorar la interacción. Este documento investiga la viabilidad del modelado y la cuantificación de HRI en robótica asistencial teniendo en cuenta este binomio y aplicando conceptos de la teoría de la información (IT), así como la implementación de un entorno virtual que permita la validación experimental de las posibles mejoras.

Abstract

Human-Robot Interaction (HRI), in assistive robotics, has several important features that distinguishes it from other forms of interaction. Some of them are the need for great flexibility, security and confidence in the control of the robotic system. The binomial human-robot concept, with the user and the robot acting within a closed control loop, can be valuable in order to interaction understanding and improvement. This document investigates the feasibility of modeling and quantification of HRI in assistive robotics, taking into account this binomial and applying concepts of the theory of information (IT), as well as the implementation of a virtual environment that will enable the experimental validation of possible improvements.

1. Introducción

Los robots asistenciales se están desarrollando actualmente como apoyo a discapacitados y personas mayores dentro de sus hogares y en otros entornos cotidianos. Un ejemplo de este tipo es el robot escalador asistencial ASIBOT, desarrollado en la Universidad Carlos III de Madrid [1]. La interacción humano-robot en robótica asistencial tiene un buen número de características importantes. La primera de todas es la diversidad de los potenciales usuarios, con diferentes tipos y grados de discapacidad, tanto física como mental. Un impacto potencial de la robótica asistencial es aumentar el nivel de independencia de estos usuarios. En segundo lugar, la seguridad es una característica de gran importancia. Los robots de asistencia normalmente requieren su operación cerca el usuario, realizando tareas en entornos no estructurados del mundo real (por ejemplo, entornos domésticos). La calificación del fallo (coste) en la realización de una tarea determinada oscila entre insatisfacción del usuario, pasando por daños a la propiedad, hasta lesiones del propio usuario. De aquí surge la importancia de incluir el usuario dentro del bucle de control. Finalmente, los usuarios de robótica asistencial normalmente viven y dependen de sus robots. Si bien la interacción debería ser "natural", especialmente para los usuarios no expertos, la eficacia en la realización de tareas probablemente será cada vez mayor cuanto más esté el usuario familiarizado con el robot.



Figure 1: Escenas de operación de ASIBOT en entornos domésticos.

2. Modelando la interacción humano-robot en robótica asistencial

Dadas las características del HRI en robótica asistencial, proporcionar a los usuarios métodos eficaces de utilizar estos robots en su vida cotidiana es un verdadero desafío. Un interesante punto de vista es considerar al sistema completo como un binomio humano-robot. Este binomio incluye al usuario y al robot actuando dentro de un bucle cerrado. En este sistema, ambos agentes deben ser potencialmente capaces de adaptarse el uno al otro.

Para comprender un sistema tan complejo el desarrollo de un modelo sería beneficioso. La Teoría de la Información ha sido sugerida recientemente como una herramienta prometedora para analizar y mejorar HRI [2]. Touchette y Lloyd [3] representan un sistema de control como un grafo acíclico dirigido de variables aleatorias y lo analizan utilizando conceptos de dicha teoría. Este concepto se ha extendido posteriormente a sistemas hombre-máquina generales [4]. Basada en este trabajo, se han definido el modelo para robótica asistencial [5], que se muestra en la figura 2.

Figure 2: Grafo acíclico directo que representa el binomio robot-humano dentro de un bucle de control cerrado en HRI [5].

Para cada paso de tiempo k , el sistema tiene una variable aleatoria que representa el estado actual X_k , con valores $x_k \in \mathcal{X}_k$ y un estado futuro X_{k+1} . La variable aleatoria que representa al usuario, H_k (el humano), depende del estado actual. Por lo tanto, el usuario es capaz de observar el robot en el entorno de trabajo directamente. Al mismo tiempo el robot, R_k , utiliza sus sensores, S_k , para obtener una idea sobre el estado actual del sistema. El usuario actúa sobre el dispositivo de entrada i de los n -dispositivos disponibles, donde la variable aleatoria D_{ik} depende de la intención del usuario y un ruido aleatorio Z_{ik} . Sin embargo, el usuario actúa también sobre la base j de las m -modalidades posibles de retroalimentación del robot, donde la variable aleatoria F_{jk} depende, probabilísticamente hablando, del conocimiento del robot sobre el estado del sistema y del ruido V_{jk} . Para las modalidades de entrada y de retroalimentación, el ruido es modelado explícitamente para representar la parte de la interacción que no depende estadísticamente del mensaje del agente actuando como origen del control. Finalmente, el robot actúa basándose en la entrada con ruido proporcionada por el usuario y la información de sus propios sensores para generar el estado siguiente X_{k+1} .

El estado del sistema supuesto incluye el robot físico, el usuario humano y los objetos físicos u obstáculos relevantes para la tarea. La variable aleatoria que representa la sensorización del robot, S_k , representa la interpretación del robot del estado observado. El actuador robótico, A_k , representa la interpretación del robot de la acción que se debe ejecutar, basándose en el estado observado y la entrada del usuario.

El objetivo final es investigar si ASIBOT, y otros robots asistenciales similares, pueden ser mejorados teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios reales. Uno de los resultados más significativos es que la teoría de la información [6] puede ser aplicable a facilitar la adaptación cognitiva entre el robot y el usuario. Más específicamente, es posible obtener un modelo del sistema en bucle-cerrado, que puede dar una idea de cómo es posible mejorar la interacción hombre-máquina. Por ejemplo aumentando la multimodalidad y redundancia del HMI. También es posible definir métricas para cuantificar el rendimiento; estas métricas también tienen potencial para motivar la adaptación mutua entre el usuario y el robot asistencial. Las métricas han sido utilizadas en pruebas de seguimiento de 1D con usuarios sin discapacidades [4]. Este trabajo está en línea con los objetivos iniciales de tener un interfaz que pueda ajustarse al usuario y aumentar el flujo de información entre los usuarios y los robots asistenciales.

3. Medición del comportamiento HR

Dado el modelo de la figura 2, las probabilidades condicionadas que representan las correlaciones de las diferentes variables aleatorias pueden ser definidas, por ejemplo $p(s_k | x_k)$. Estas correlaciones pueden considerarse como canales de comunicación con ruido entre las variables aleatorias. La información en una correlación puede ser representada formalmente por la información mutua entre las variables aleatorias. Por ejemplo $I(S_k; X_k)$ representa la información de la correlación entre la interpretación del robot del estado y el verdadero estado. En [3], esto se definió como el canal del sensor, con un canal de actuación complementario. También hay equivalencias en los canales "Entorno a Robot" y "Robot a Entorno", identificados en [2]. Un tercer canal, el canal "Humano a Robot" (o "Humano-Máquina") es especialmente importante en interacción dentro de la robótica asistencial. El ruido en este canal, diseñado explícitamente como Z_{ik} , puede verse aquí como la discapacidad física del usuario, limitando la capacidad del canal. La capacidad de transmitir los comandos previstos de las tareas sobre dispositivos de entrada redundantes puede ayudar a reducir los errores. La cantidad de coordinación entre dos modalidades s y t , puede cuantificarse como $I(D_{sk}; D_{tk})$ [4]. Al mismo tiempo, la cantidad de información (comandos) para transmitir a través del canal puede ser reducida dotando al robot de un mayor grado de autonomía. Sin embargo, esto debe ser equilibrado con el rendimiento del sistema en tareas relevantes. Un usuario puede preferir mantener un alto grado de control si se

incrementa el tiempo para completar la tarea, o la frecuencia y/o gravedad de errores con el incremento autonomía del robot. La "dificultad" de una tarea y el número de errores permitidos es tema de interés. Para casos de movimientos 1D, 2D y en algunos 3D, existen modelos que proporcionan una medida del índice de dificultad (ID) de una tarea dada una tasa de error (por ejemplo, la ley de Fitts). Esto permite algún grado de generalización sobre los resultados de tareas similares y un marco para la realización de experimentos "serios". El cuarto canal incluido en el modelo es el "Robot a Humano", también en [2]. Sin embargo, una distinción importante en el modelo descrito aquí es que el usuario también tiene su propia interpretación del estado del sistema, a través de la observación del robot. De esta forma, se incluye un quinto canal "Entorno a Humano", representado por $I(H_k; X_k)$.

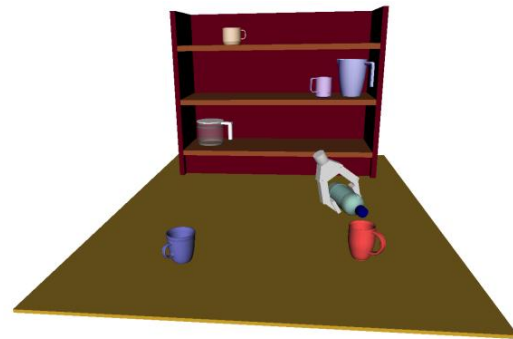


Figure 3: Ejemplo de entorno virtual simplificado para experimentación y evaluación de esquemas de HRI para robots asistenciales.

3.1. SOBRE LA CUANTIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

Pero, ¿cómo pueden ser estas correlaciones medidas y cuantificadas? Un método para calcular la información mutua entre dos variables aleatorias es, simplemente, medir las frecuencias de los eventos que se producen y utilizarlos como base para estimar las probabilidades necesarias. Esto requiere una cantidad considerable de datos y un diseño adecuado del experimento. Un ejemplo es el seguimiento 1D de tareas en [4], midiendo el rendimiento utilizando información mutua del cursor y del destino, ya sea en un intervalo de tiempo del movimiento del cursor ($I(X_k; X_{k+1})$) o utilizando "información predictiva" del siguiente paso. Sin embargo, se necesitan tareas más complejas para abordar de forma real el control de un robot asistencial. En la figura 3, el experimento incluye obstáculos y objetos de interés, pero sólo un sencillo efector final que representa el robot de asistencia. De esta manera, puede ser evaluado el efecto de alterar el HRI reduciendo factores que son difíciles de controlar en un experimento. Por ejemplo oclusiones visuales causadas por la estructura del robot, así como las colisiones entre el entorno y una parte no visible del robot. La posibilidad de cuantificar la "dificultad" y el rendimiento del binomio humano-robot en dichas tareas debería ayudar a la mejora de la interacción en robótica asistencial. Este es uno de los objetivos principales del trabajo presentado en esta publicación.

4. Metodología aplicada

Parte de la metodología utilizada ha tenido una fundamentación y desarrollo teórico. Esto ha incluido la aplicación de la teoría de información combinada con modelos simples de grafos acíclicos dirigidos al sistema, en base a trabajos que han aplicado estos conceptos a sistemas de control, presentados por Touchette y Lloyd, [3]. El método puede ayudar a entender y cuantificar el sistema completo del conjunto usuario y robot asistencial, operando en un bucle cerrado. Se han identificado métricas estadísticas, por ejemplo "predictive information" [7], que pueden dar información sobre el rendimiento del sistema, con y posiblemente, sin información sobre la tarea que el usuario desea hacer. El uso potencial de teoría de información en hacer análisis de interacción hombre-robot en general ya ha sido identificado anteriormente [2].

Por otra parte la metodología se complementa con el desarrollo de software y hardware orientados a mejorar las capacidades del robot [8]. Por ejemplo, en [10] la integración de sistema de visión mediante cámaras IP o en [9] la revisión del diseño del manipulador asistencial óptimo desde un punto de vista cinemático para un entorno doméstico complejo como puede ser una cocina es fundamental para optimizar las posibilidades de actuación del robot sobre el entorno. Otro ejemplo, de mejora en ámbito de interfaces HW ha sido la implementación de una interfaz cerebro-ordenador para ASIBOT. Se ha implementado una versión simple de un

interfaz cerebro-ordenador, en base a los ritmos sensorimotor, de frecuencia 8-30 Hz (μ /beta). El interfaz ha sido desarrollado en base a BCI2000, pero con una conexión al mismo entorno simulado para ASIBOT implementado en OpenRave. Se han realizado pruebas de seguimiento en 1D con este interfaz para verificar la eficacia de este dispositivo de entrada. Los resultados indican que es posible controlar 1 grado de libertad, pero con muy baja exactitud [11]. ASIBOT también tiene la posibilidad de ser controlado por joystick de 6 grados de libertad (SpaceNavigator) y sensores de inclinación (por ejemplo sensores de Nintendo Wii-mote) [12], sobre los cuales se están implementando esquemas de control accesibles e intuitivos.

Otro ejemplo es el desarrollo de la arquitectura para hacer experimentos controlados enfocados en robótica asistencial (con otra estudiante PFC), así como la implementación de módulos iniciales para explorar control compartido y mejoras al control de la sistema. Finalmente, la metodología ha incluido experimentos con usuarios sin discapacidades. Estas pruebas se han centrado en dos aspectos: investigar la aplicación de nuevas métricas de rendimiento para sistemas como robots asistenciales, y cuantificar el rendimiento de la interfaz cerebro-ordenador.

5. Entorno virtual de experimentación

Uno de los objetivos de la línea de investigación iniciada por el grupo investigador [13] es implementar funcionalidades de hardware y software que aumenten la seguridad en el uso del sistema. En esta dirección, se han realizado pruebas iniciales para avanzar en el conocimiento de cómo integrar información del entorno para mejorar la interpretación de la intención del usuario. Por ejemplo, utilizando sensores que miden distancia, localizados en la mano del robot. Para medir el impacto de este tipo de control compartido y otros cambios en el sistema, se está desarrollando una arquitectura de software para hacer pruebas. Esta arquitectura incluye todos los componentes necesarios para manejar experimentos controlados como la ley de Fitts' [14]. En la figura 3, se muestra una captura, a modo de ejemplo, del entorno virtual que ha sido desarrollado en base a OpenRAVE, para entre otros objetivos, controlar la información que se realimenta (feedback) al usuario.

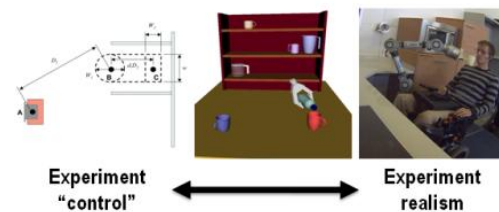


Figure 4: Aproximaciones sucesivas para el diseño de entornos virtuales de experimentación para evaluación de robots asistenciales.

entorno de experimento el mobiliario correspondiente a una cocina y un objetivo que ocupa, para cada ensayo, distintas posiciones con diferente grado de complejidad. El propósito fundamental del experimento consiste en el posicionamiento de una lata de refresco, sostenida por una mano robótica, en el interior del objetivo, representado por una lata de mayores dimensiones. Se pretende que cada tarea se realice en el menor tiempo posible evitando cualquier tipo de colisión con el entorno. Para la consecución de dicho fin se envía asiduamente las medidas correspondientes con los valores de posición y orientación de la lata, datos adquiridos por sensores y colisiones detectadas con el entorno. Asimismo, se le proporcionan a la mano robótica tanto las velocidades de desplazamiento como los datos de su posición primigenia para cada ensayo.

Esta arquitectura ha sido implementada de forma que es relativamente sencillo ajustar la configuración del experimento y el ejercicio a ensayar, para poder variar el nivel de control según las necesidades, tendiendo a simular situaciones cada vez más complejas a medida que al desplazarse a la derecha, según el esquema presentado en la figura 4, se gana realismo a consta de perder control sobre el experimento.

6. Trabajos futuros

Gracias a este entorno virtual, se facilita la experimentación previa al uso del sistema real. En este sentido se continuará con el

trabajo sobre control compartido; utilizando sensores específicos para implementar estrategias de “collision avoidance” en 3D aplicables en tiempo real. Dentro de esta tarea, cabe resaltar la importancia de identificar el mejor tipo de sensor y cómo usar la información obtenida del mismo para discernir entre contactos voluntarios y colisiones. Los sensores pueden ir montados en el robot o en el entorno. Se pretende mejorar la interpretación de la intención del usuario, implementando esquemas similares al control compartido para sillas de ruedas ya utilizados con éxito, por ejemplo [15]. También se va a seguir desarrollando la arquitectura de experimentos mencionada previamente. Esta va a ser utilizada para hacer experimentos que pueden dar respuestas cuantitativas sobre el cambio de rendimiento cuando se introducen cambios en el sistema. El desarrollo también va a incluir módulos para interpretar múltiples interfaces a la vez. Esto puede contribuir a entender el mejor uso de multimodalidad y redundancia [16].

Otra parte de la investigación se va a centrar en el rol de los experimentos en el desarrollo de robots asistenciales. Así como una comparación de ventajas e inconvenientes entre experimentos controlados, típico en psicología experimental y que normalmente usan tareas simples, y los experimentos con condiciones más realistas. Por ejemplo, pruebas con un sistema robótico completo en tareas típicas diarias. Esto incluye el uso de usuarios con discapacidades reales en los pruebas [17]. También si es posible extender las métricas identificadas (como “predictive information”) a tareas más generales y más parecidas a la situación diaria para usuarios con discapacidades.

Finalmente, se ha constatado la necesidad de realizar experimentos extensivos, utilizando el conocimiento generado en las tareas descritas anteriormente. El objetivo es utilizar estos experimentos para cuantificar el rendimiento del sistema con los avances desarrollados previamente en interfaces, control compartido y autonomía. Esperamos que el esfuerzo previsto en cuantificar los cambios en el rendimiento, sea útil al desarrollo de tecnologías asistenciales, a través de la publicación de datos reales, verificables y reproducibles.

7. Conclusiones

El complejo problema de la interacción persona-robot está siendo modelado en base a un grafo acíclico directo que representa el binomio robot-humano dentro de un bucle de control cerrado. La interacción ha sido incluida como cinco canales de comunicación con ruido y se ha discutido la cuantificación experimental del rendimiento utilizando conceptos de la Teoría de la Información.

También se han validado nuevas métricas para cuantificar el rendimiento; estas métricas también tienen potencial para motivar la adaptación mutua entre el usuario y el robot asistencial. Las métricas han sido utilizadas en pruebas de seguimiento de 1D con usuarios sin discapacidades y de pick and place en entornos virtuales 3D para lo cual se ha implementado la arquitectura software descrita en el apartado 5. Este trabajo está en línea con los objetivos iniciales de tener un interfaz que pueda ajustarse al usuario y

aumentar el flujo de información entre los usuarios y los robots asistenciales.

8. Referencias

- [1] C. Balaguer; A. Giménez; A. Jardón. The MATS robot: Service Climbing Robot for Personal Assistance. IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 13. No. 1. pp.51-58. 2006
- [2] K. Gold. An information pipeline model of human-robot interaction. Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction - HRI '09, page 85, 2009.
- [3] H. Touchette and S. Lloyd. Information-theoretic approach to the study of control systems. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 331(1-2):140–172, 2004.
- [4] M.F. Stoelen, A. Jardón, J.G. Vítores, C. Balaguer, F. Bonsignorio. Information Metrics for Assistive Human-In-The-Loop Cognitive Systems. Workshop on Good Experimental Methodology in Robotics and Replicable Robotics Research, Robotics Science and Systems (RSS). Zaragoza. Spain. June, 2010.
- [5] M.F. Stoelen, A. Jardón, V. Fernández, C. Balaguer, F. Bonsignorio. An Information-Theoretic Approach to Modeling and Quantifying Assistive Robotics HRI. Late Breaking Report, Proceedings of the 6th international conference on Human-Robot Interaction, Lausanne, 2011.
- [6] C. Shannon. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379–423, 1948.
- [7] W. Bialek; I. Nemenman; N. Tishby. Predictability, complexity, and learning. Neural computation, Vol. 13(11), pp. 2409-63, 2001.
- [8] J.G. Vítores; A. Jardón; F. Bonsignorio; M.F. Stoelen; C. Balaguer. Benchmarking Usability of Assistive Robotic Systems: Methodology and Application. Workshop on the Role of Experiments in Robotic Research, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Anchorage, AK. USA. May, 2010.
- [9] A. Jardón; M.F. Stoelen; F. Bonsignorio; C. Balaguer. Task-Oriented Kinematic Design of a Symmetric Assistive Climbing Robot. In revision, IEEE Transactions on Robotics.

[10] J.G. Vítores; A. Jardón; M.F. Stoelen; S. Martínez; C. Balaguer. ASIBOT Assistive Robot with Vision in a Domestic Environment. Robocity2030 7th Workshop. Móstoles. Spain. Oct, 2010. Visión en Robótica. ISBN: 84-693-6777-3. Universidad Rey Juan Carlos. pp. 61-74. 2010.

[11] Cristina Cárceles Fdez. Estudio de requisitos para hmi de control del robot asistencial ASIBOT. 2_FERNANDEZ DE TEJADA MENDIOLA, VIRGINIA_80PFC I.T.I., esp. Electrónica Industrial. Directores: M. Stoelen, A. Jardón. Julio 2010.

[12] Jardón, A., Martínez, S., Giménez, A. & Balaguer, C. (2008), Assistive robots dependability in domestic environment: the asibot kitchen test bed, in '6th IARP/IEEE-RAS/EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments', Pasadena, CA.

[13] A. Jardón, A. Giménez, R. Correal, R. Cabás, S. Martínez, and C. Balaguer, A portable light-weight climbing robot for personal assistance applications, Industrial Robot: An International Journal, vol. 33. no. 4. pp. 303-307, 2006.

[14] ISO (2002). Reference Number: ISO 9241-9:2000(E). Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 9 - Requirements for non-keyboard input devices (Vol. February 15, 2002): International Organisation for Standardisation.

[15] E. Demeester; A. Huntemann; D. Vanhooydonck; G. Vanacker; H.V. Brussel; M. Nuttin. User-adapted plan recognition and useradapted shared control: A bayesian approach to semi-autonomous wheelchair driving.

Journal of Autonomous Robots, Vol. 24, pp. 193–211, 2008.

[16] S. Oviatt. Ten Myths of Multimodal Interaction. Communications of the ACM, Vol. 42(11), 1999.

[17] K.M. Tsui; H.A. Yanco. Towards Establishing Clinical Credibility for Rehabilitation and Assistive Robots Through Experimental Design. Workshop on Good Experimental Methodology In Robotics, Robotics, Science and Systems (RSS), 2009.

9. Derechos de autor

El autor o los autores de los artículos presentados como soporte documental para sus intervenciones en el Congreso, en el mismo acto de enviarlos para su aprobación, aceptan la cesión de los derechos de autor sobre los mismos para su publicación en el libro de actas del Congreso.