

# Aprentatge automàtic en xarxes i robots: reptes tecnològics i implicacions ètiques

Discurs de presentació de Carme Torras i Genís  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 17 de desembre de 2018



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

Aprenentatge automàtic  
en xarxes i robots:  
reptes tecnològics  
i implicacions ètiques



# Aprenentatge automàtic en xarxes i robots: reptes tecnocientífics i implicacions ètiques

Discurs de presentació de Carme Torras i Genís  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 17 de desembre de 2018

Barcelona, 2018



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

**Torras, Carme, autor**

Aprenentatge automàtic en xarxes i robots : reptes tecnocientífics i implicacions ètiques. —

Primera edició

Bibliografia

ISBN 9788499654393

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia II. Títol

1. Aprenentatge automàtic 2. Robòtica personal

3. Innovacions tecnològiques — Aspectes ètics i morals

007.52

004.896-027.552

005.591.6:17

© Carme Torras i Genís

© 2018, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: desembre del 2018

Text revisat lingüísticament per la Unitat de Correcció del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunce | Ventura

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Imprès a Service Point FMI, SA

ISBN: 978-84-9965-439-3

Dipòsit Legal: B 28589-2018

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del *copyright*, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reprografia i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

## 1. INTRODUCCIÓ

Ara que tot evoluciona tan de pressa, la capacitat d'adaptació i d'aprenentatge es valora molt; també en les màquines. Però a què ens referim exactament quan diem que un programa que classifica imatges, un traductor automàtic o un robot «aprenen»? Quins tipus d'adaptació i d'aprenentatge estan a l'abast d'una màquina? El món biològic ens ofereix un ric ventall de mecanismes d'adaptació a l'entorn i d'aprenentatge a diferents nivells, relacionats amb la supervivència i l'autonomia dels organismes i, en última instància, amb el que denominem *intelligència*. Des dels orígens de la cibernètica i de la intel·ligència artificial a mitjan segle xx, els investigadors hi han cercat inspiració per tractar de reproduir aquests mecanismes amb mitjans tecnològics.

Ja aleshores, Herbert A. Simon (1969) alertava del perill de prendre's aquesta inspiració de manera massa literal, perquè el millor mecanisme natural pot distar molt de la millor solució amb mitjans artificials. Rodes, ales i calculadores són esmentades sovint com a exemples de solucions artificials considerablement diferents dels seus equivalents naturals, i més eficients en certs aspectes. Els recursos disponibles per al disseny en enginyeria són molt diferents dels de la naturalesa, i no només pel que fa als materials, sinó també quant al nombre de mostres i a l'extensió de temps amb què es treballa. Feta aquesta consideració, és clar que els mecanismes existents en la naturalesa han guiat el desenvolupament de tècniques en aquest àmbit, i el paral·lelisme ens ajudarà a situar les diferents subàrees d'aquest ampli camp de recerca.

Cal precisar què entenem per *adaptabilitat* i per *aprenentatge*, què tenen en

comú i en què difereixen. Ambdós conceptes fan referència a la «capacitat d'auto-modificació» que tenen alguns agents i que els permet mantenir una conducta adequada davant de canvis en l'entorn, o millorar el rendiment quan s'enfronten repetidament a la mateixa situació. El *Diccionari de la llengua catalana* de l'Institut d'Estudis Catalans (DIEC) dona pistes sobre les diferències que hi ha entre aquests dos conceptes, en definir *adaptació* com el «procés mitjançant el qual un individu, un grup o una collectivitat s'acomoden i viuen en llur medi físic i social», i *aprenentatge* com el «procés pel qual un individu o una collectivitat adquireixen coneixements, habilitats, trets o pautes culturals, com el llenguatge, els prejudicis, les normes, les creences, les regles de conducta». Simplificant, podríem dir que l'adaptació es produeix més aviat a nivell subsimbòlic, mentre que l'aprenentatge és sobretot simbòlic. Sovint, l'aprenentatge es considera una forma d'adaptació, especialment al context cultural. També podríem relacionar ambdós conceptes amb els processos d'acomodació i assimilació que caracteritzen l'evolució i l'adaptació del psiquisme humà segons Jean Piaget (1977).

## 2. TIPUS D'ADAPTACIÓ I APRENETATGE

En el món biològic, l'agent amb capacitat d'automodificació esmentat pot ser una sola cèl·lula, un òrgan, un individu o fins i tot una societat, perquè l'adaptació s'hi produeix en tots aquests àmbits, cadascun amb una possible contrapart artificial (taula 1).

TAULA 1  
*Nivells d'adaptació i disciplines afins*

| <i>Nivell d'adaptació</i> | <i>Tipus d'adaptabilitat</i> | <i>Disciplina «artificial»</i> |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Cellular                  | Plasticitat                  | Modelització neuronal          |
| Sensoriomotor             | Memòria associativa          | Xarxes neuronals               |
| Cognitiu                  | Aprenentatge simbòlic        | Intel·ligència artificial      |
| Espècie                   | Evolució                     | Computació evolutiva           |

FONT: Elaboració pròpia.

En l'àmbit cel·lular, es coneixen diversos mecanismes químics i elèctrics de plasticitat, alguns dels quals s'han modelat i analitzat dins del camp de la modelització neuronal —vegeu els capítols sobre plasticitat neuronal a Arbib (2002)— i, posteriorment, s'han aplicat al control motor de sistemes artificials, per exemple a la generació de patrons de locomoció periòdics per a robots amb potes.

Pel que fa a l'adaptació dels individus, s'acostuma a distingir entre el nivell sensoriomotor i el nivell cognitiu. L'adaptació sensoriomotora consisteix a esta-

blir associacions rellevants entre estímuls i respostes, mentre que l'aprenentatge cognitiu implica construir representacions simbòliques per guiar la presa de decisions. Dues disciplines han intentat reproduir aquestes capacitats: les xarxes neuronals —que recentment han ressorgit en forma d'aprenentatge profund (*deep learning*) (Goodfellow *et al.*, 2016)— han resultat adequades per dur a terme tasques massivament paral·leles com les de percepció i coordinació visuomotora, mentre que en el si de la intel·ligència artificial s'han desenvolupat les estructures de dades i els procediments necessaris per abordar l'aprenentatge simbòlic (Mitchell, 2006). A partir d'ara, centraré el discurs en aquests dos tipus d'adaptabilitat dels individus.

Abans, però, cal esmentar que els mecanismes de l'evolució pels quals s'adapten les espècies han estat font d'inspiració de la computació evolutiva (De Jong, 2006) i els algorismes genètics (Goldberg, 2006), utilitzats en aplicacions d'optimització global i multivariable, així com per adaptar els genotips de robots a determinats entorns i tasques (Nolfi *et al.*, 2016).

### 3. APRENTATGE AUTOMÀTIC: TÈCNiques I APLICACIONS

Sovint, les tècniques que tracten de reproduir artificialment l'adaptabilitat dels individus —files 2 i 3 de la taula 1— s'engloben sota la denominació *aprenentatge automàtic* (*machine learning*).

Segons l'Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI), «el camp de l'aprenentatge automàtic tracta de respondre la pregunta: “Com podem construir sistemes informàtics que millorin amb l'experiència, i quines són les lleis fonamentals que regeixen tots els processos d'aprenentatge?” Aquesta pregunta abasta una àmplia gamma de tasques d'aprenentatge, com la millora en la navegació dels robots mòbils (o vehicles autònoms) a partir de la seva experiència, la mineria de dades (*data mining*) en registres mèdics històrics per determinar quins pacients futurs respondran millor a quins tractaments, i com construir motors de cerca a Internet que s'adaptin automàticament als interessos dels seus usuaris».

Més formalment, Mitchell (2006) proposa la definició següent: «diem que una màquina aprèn respecte a una tasca particular  $T$ , una mètrica de rendiment  $P$  i un tipus d'experiència  $E$ , si el sistema millora el seu rendiment  $P$  en la tasca  $T$  utilitzant l'experiència  $E$ . Depenent de com especifiquem  $T$ ,  $P$  i  $E$ , la tasca d'aprenentatge pren diversos noms, com mineria de dades, descobriment autònom, actualització de bases de dades, programació mitjançant exemples, etc.».

L'aprenentatge automàtic es troba en la intersecció entre la informàtica i l'estadística. També està fortament relacionat amb les neurociències, la psicologia cognitiva, la teoria de control i, recentment, amb l'economia. Essencialment, podem distingir tres tipus de tècniques: no supervisades (agrupació de dades), su-



pervisades (construcció d'un model a partir d'exemples) i per reforçament (optimització d'una funció de cost). En cadascun d'aquests tipus s'han proposat algorismes a dos nivells: simbòlic i numèric. Per posar un exemple, la inferència de regles que descriguin les relacions causa-efecte en un domini determinat se situa en el nivell simbòlic, mentre que les xarxes neuronals ocuparien el nivell numèric (aproximació paramètrica de funcions).

En ser una eina transversal, l'aprenentatge automàtic té aplicació en tota mena d'àmbits. Això ha propiciat una gran demanda de formació de persones amb trajectòries molt heterogènies i han proliferat els cursos en línia sobre el tema —el curs *Machine learning* de la Universitat de Stanford<sup>1</sup> té molt d'èxit. Algunes aplicacions il·lustratives que es repassen en aquest curs són: cotxes sense conductor, reconeixement de la parla, navegadors d'Internet, desxiframent del genoma humà, percepció i control de robots intel·ligents, comprensió de textos (cerques web, filtres antiinundació o *anti-spam*), visió per computador, informàtica mèdica, processament d'àudio i mineria de bases de dades. Podríem afegir, també, sistemes recomanadors, obtenció de perfils de client per a aplicacions bancàries, descoberta de medicaments i avaluació toxicològica, traducció automàtica, cerca i etiquetatge de fotos, segmentació i seguiment d'objectes i persones en vídeos, i un llarg etcètera.

En aquest discurs focalitzaré en les tècniques d'aprenentatge que estan a la base de nombroses aplicacions en xarxa i en robots que aprenen de la quantitat ingent de dades penjades a Internet i de la interacció amb les persones.

#### 4. LES XARXES I ELS ROBOTS ESDEVENEN «SOCIALS»

La invenció d'Internet i la irrupció dels telèfons mòbils han propiciat l'aparició de les xarxes socials. Un fenomen difícil de preveure fa tan sols un parell de dècades, com tampoc no ho era que els robots sortissin de l'àmbit estrictament laboral per donar pas als anomenats *robots socials*, que cada vegada veurem més en entorns quotidians: assistint persones amb discapacitats i persones grans, fent de recepcionistes o dependents en centres comercials, com a guies en fires i museus, com a companys de joc de joves i adults i, fins i tot, exercint de mainaders i mestres de reforç (figura 1).

No només els robots trobaran més aplicació en entorns humans com la sanitat, l'educació i l'entreteniment, sinó també en àrees de serveis com la logística, la neteja de grans superfícies i el monitoratge ambiental. Així mateix, augmentarà el seu repertori d'activitats en l'àmbit laboral i ja no els trobarem només en cadenes de producció a les fàbriques, sinó que cada vegada més col·laboraran activament amb operaris humans com a companys de feina.

1. <https://www.coursera.org/learn/machine-learning>.



FIGURA 1. Exemples de robots d'assistència a persones amb discapacitats, guiatge en grans superfícies, i fent funcions de recepcionista, de company de jocs i de mestre de reforç.

FONT: Torras (2017b).

Aquest desplaçament de la robòtica cap al sector de serveis s'alineja amb l'auge de les tecnologies per a ciutats intel·ligents (*smart cities*). Aplicacions tan diverses com la recollida d'escombraries, el reciclatge, la vigilància i la seguretat viària requereixen combinar intel·ligència ambiental amb robots autònoms. En aquest sentit hi ha projectes molt ambiciosos en marxa, com ara el desenvolupament d'una xarxa on els robots podran compartir dades i procediments, és a dir, mapes dels edificis visitats, habilitats de manipulació adquirides i altres coneixements apresos, en un format comú i independent del maquinari de cadascun. Aquesta xarxa estarà connectada a la Internet de les coses (*Internet of things*), de la qual els robots podran obtenir models d'objectes i instruccions d'ús per a tot tipus de productes comercials.

Es diu que aquestes noves tecnologies informàtiques i robòtiques suposen un pas més en la transformació social que va començar amb la revolució agrària i va continuar amb la revolució industrial. És cert, però cal remarcar que hi introdueixen una diferència qualitativa. Ja no es tracta merament de mecanitzar feines pesades i repetitives al camp i a les fàbriques, ni de fer que els electrodomèstics alliberin temps que les persones puguin utilitzar de manera més creativa i plaent. La diferència rau en què aquestes noves tecnologies estan dissenyades per interactuar amb les persones en els seus entorns quotidians, la qual cosa imposa un seguit de nous requeriments tècnics que descriuré tot seguit, alhora que té unes implicacions ètiques i socials que exposaré més endavant, a la secció 6.

El requeriment més important d'aquestes tecnologies interactives és precisament la capacitat d'adaptar-se a cada usuari (el que es coneix com a *personalització*) i aprendre de les experiències, ja siguin interaccions vehiculades per aplicacions informàtiques o experiències sensoriomotors d'un robot amb l'entorn. L'adaptabilitat és el que permet generalitzar d'una situació a una altra, ser tolerant a percepcions i accions imprecises i desenvolupar-se adequadament en entorns no predefinits i dinàmics.

En la secció següent, desgranaré els reptes tecnocientífics que plantegen aquestes tecnologies, així com les tècniques d'aprenentatge que s'estan utilitzant per abordar-los. Per il·lustrar-ho, faré servir els resultats d'alguns projectes europeus en què des del grup Percepció i Manipulació Robotitzada de l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI) —grup consolidat RobIRI de la Generalitat de Catalunya— hem participat i estem participant. En concret, els projectes CLOTHILDE<sup>2</sup> i I-DRESS,<sup>3</sup> que tenen per objectiu la manipulació robotitzada de peces de roba en els contextos de logística hospitalària, la venda per Internet i l'ajuda a vestir a persones amb mobilitat reduïda; el projecte SOCRATES,<sup>4</sup> dedicat a la robòtica assistencial per a persones grans que poden tenir deficiències cognitives lleus, i els projectes INTELLACT<sup>5</sup> i IMAGINE,<sup>6</sup> centrats a dotar els robots de les habilitats de percepció i manipulació necessàries per fer tasques de manteniment d'aparells i reciclatge de productes electrònics.

## 5. REPTES TECNOCIENTÍFICS

En els entorns humans proliferen els objectes deformables, com ara roba, cables, líquids o les persones mateixes, que les tecnologies interactives han de poder percebre i, en el cas d'alguns robots assistencials i de serveis, també han de ser capaços de manipular. Això suposa un repte formidable, ja que aquests objectes tenen uns espais d'estats molt més complexos que les sis variables de posició i orientació que caracteritzen la posa dels objectes rígids. Les tècniques geomètriques de visió desenvolupades per a objectes rígids no són escalables a espais de deformació de dimensió potencialment infinita, cosa que ha propiciat que es recorri a tècniques d'aprenentatge per trobar les característiques visuals rellevants per acomplir una tasca sense haver de determinar de manera precisa la forma que ha adoptat l'objecte.

Un altre repte important és que la interfície persona-màquina ha de ser amigable, en el sentit que ha de ser fàcil d'utilitzar per persones no expertes. En el cas

2. <https://www.iri.upc.edu/project/show/187>.

3. <https://i-dress-project.eu>.

4. <http://www.socrates-project.eu>.

5. <https://www.iri.upc.edu/project/show/110>.

6. <https://imagine-h2020.eu/start>.

de robots que han de ser instruïts per fer una tasca de manipulació, se sol utilitzar aprenentatge per demostració o per imitació.

Sovint es desitja anar un pas més enllà i que l'aplicació informàtica o el robot s'adapti a les preferències o les limitacions de l'usuari. Aquesta personalització pot requerir la construcció d'un model de l'usuari a partir de les seves dades i, en el cas d'un robot que ha d'interaccionar físicament amb la persona, se sol recórrer també a l'aprenentatge per demostració (*learning from demonstration*) modificant, per exemple, els moviments predefinitos del robot a gust de l'usuari.

La seguretat és, no cal dir-ho, un requeriment *sine qua non* de la interacció amb les persones, tant pel que fa a les dades i el programari, com a la prevenció de qualsevol dany físic en el cas dels robots.

I, per damunt dels aspectes esmentats, que són específics de la interacció amb les persones, es persegueix que aquestes noves tecnologies informàtiques i robòtiques millorin el seu rendiment amb l'experiència. La capacitat de millora és abordada a diversos nivells, des de l'aproximació de funcions parametritzades utilitzant aprenentatge per reforçament (*reinforcement learning*) fins a la planificació de tasques i transferència de coneixement utilitzant tècniques d'aprenentatge simbòlic.

A continuació, aprofundiré en cadascun dels reptes apuntats.

### 5.1. *Percepció d'objectes deformables*

En els entorns quotidians sovint les entitats a percebre no són objectes rígids, sinó peces flexibles (com la roba), materials deformables (com el menjar) o fins i tot éssers animats (com els animals o les persones mateixes amb què cal interactuar). Com deia, l'estat d'un objecte rígid queda determinat amb sis paràmetres (formalment, l'espai de poses és  $\mathbb{R}^3 \times SO(3)$ ), mentre que el moviment d'un objecte no rígid comporta un canvi en la seva forma que es produeix en un espai d'estats de dimensió potencialment infinita. Aquest enorme salt dimensional fa que les tècniques geomètriques de percepció desenvolupades per a objectes rígids siguin difícilment aplicables en aquest context. Per exemple, en el cas de peces de roba, l'extensió d'aquestes tècniques requereix modelar la tela com una malla d'elements finits que es deforma obeint certes restriccions, cosa que comporta un creixement exponencial del temps de còmput de qualsevol algorisme amb el nombre de nodes de la malla.

Per això, la recerca en aquest àmbit s'ha anat decantant cap a l'aplicació de tècniques d'aprenentatge automàtic i, en particular, l'aprenentatge profund ha dominat l'escena en els darrers anys. En el cas de la robòtica, també s'ha optat per manipular els objectes per tal de facilitar-ne la percepció. Aquesta estratègia ha estat la tendència dominant en la manipulació robotitzada de peces de vestir

(Cusumano-Towner *et al.*, 2011; Doumanoglou *et al.*, 2014), en què la roba s'agafa i es deixa fins a aconseguir una configuració que pugui ser fàcilment reconeguda amb algorismes de percepció simples.

Com que la manipulació d'un objecte per afavorir-ne la percepció resulta molt lenta, en el nostre grup hem explorat l'enfocament alternatiu d'aplicar algorismes complexos de visió per computador i aprenentatge automàtic per agafar a la primera la peça pel lloc adequat per realitzar la tasca. Per exemple, a partir d'una base de dades d'imatges de color i profunditat (RGB-D) de peces de roba que tenen anotades diferents parts (colls, punys de mànigues, cintura, vores de pantalons, etc.) com les mostrades a l'esquerra de la figura 2, hem desenvolupat un mètode (Ramisa *et al.*, 2014) que, en una fase d'entrenament, construeix un codi mitjançant la tècnica d'aprenentatge bossa de paraules (*bag of words*) i després utilitza un classificador per vectors de suport (*support vector machine*) per classificar les parts de les peces de vestir segons aquest codi. En temps d'execució, es genera una distribució de probabilitat d'on es troba la part buscada (per exemple, el coll d'un polo), a partir de la qual es determina la millor manera d'agafar-lo per acomplir una tasca (per exemple, col·locar-lo en un penjador, com es mostra a la dreta de la figura 2).

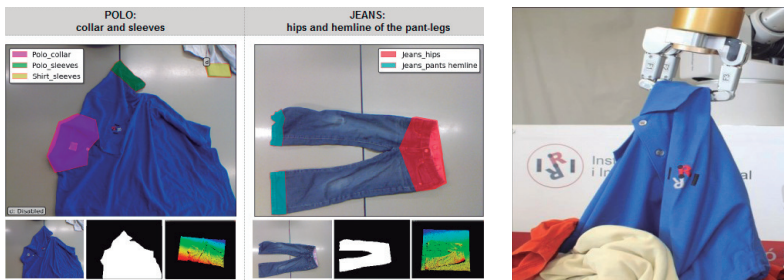


FIGURA 2. Percepció i manipulació d'objectes deformables. Esquerra: dos elements de la base de dades de peces de roba amb les parts anotades (a dalt), així com les imatges de color i profunditat (RGB-D) junt amb la plantilla per a la subtracció del fons (a baix). Dreta: el robot agafa un pel coll per penjar-lo. FONT: Web de l'IRI.

Atès que l'aprenentatge profund requereix disposar d'una gran quantitat de dades etiquetades, una tendència recent és generar-les de manera sintètica utilitzant un simulador físic. En aquesta línia, hem usat imatges sintètiques i reals de peces de roba agafades per un punt i per dos punts per entrenar una jerarquia de tres xarxes neuronals convolucionals (*convolutional neural network*, CNN), que primer identifica la peça de roba, després un punt per on agafar-la i, a continuació, un segon punt, cosa que permetrà dur la peça a una configuració coneguda

(Corona *et al.*, 2018). Així, mitjançant una estratègia de cerca activa, hem mostrat que és possible agafar una peça de vestir directament per uns punts predefinitos, sense necessitat de recórrer a processos repetitius d'agafar i deixar anar fins a arribar a la configuració desitjada.

Perquè un robot pugui ajudar una persona a vestir-se —una tasca en què treballem actualment en el marc dels projectes europeus CLOTHILDE i I-DRESS—, cal que percebi no només les peces de vestir sinó també la postura de les persones, on tenen el cap i les extremitats, i que en faci el seguiment. La representació més habitual de la figura humana és un esquelet articulats (Simó-Serra *et al.*, 2017), al qual per a aquesta aplicació cal afegir el volum del voltant. Estem abordant aquesta caracterització volumètrica mitjançant descriptors 3D (Ramisa *et al.*, 2016), obtinguts a partir dels núvols de punts proporcionats per càmeres de profunditat (Alenyà *et al.*, 2014).

## 5.2. *Interfícies amigables*

Per a una interacció persona-màquina eficaç i agradable, calen interfícies humanitzades, com ja preconitzava Alan Turing (1950) i com va recollir Ramon López de Mántaras (2018) en el seu discurs de presentació com a membre de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'IEC. Sovint aquestes interfícies són multimodals, ja que poden combinar text, veu, imatges i, en el cas dels robots, també gestos i manipulacions. En el marc del projecte SOCRATES, s'ha desenvolupat una aplicació d'entrenament cognitiu per millorar la memòria de seqüències, amb tres modalitats d'interacció (veu, imatge i intervenció del manipulador) que se seleccionen adaptativament en funció de la situació i les necessitats de l'usuari (Tarasović *et al.*, en premsa). De manera semblant, en el projecte I-DRESS, s'ha dissenyat una interfície multimodal que combina interacció verbal i gestual amb el braç robòtic, i imatges de color i profunditat de l'entorn, en una aplicació de posar sabates a persones amb mobilitat reduïda (Jevtić *et al.*, en premsa).

Quan es tracta d'ensenyar una nova tasca a un robot, cal que el procediment per fer-ho també sigui amigable i fàcil per a una persona no experta. L'aprenentatge mitjançant demostracions (Billard *et al.*, 2008) ha emergit com una eina poderosa que permet als robots adquirir les habilitats desitjades a partir de demostracions realitzades per humans. Les primeres investigacions utilitzaven càmeres per captar les demostracions amb les quals s'ensenyava als robots una seqüència d'agafar i col·locar peces en una determinada disposició, mentre que actualment l'atenció se centra en la realització de tasques dinàmiques basades en la força. De fet, les forces tenen un paper important en moltes habilitats que els robots de serveis han de tenir, com obrir portes i calaixos, utilitzar eines i tallar certs aliments, per posar-ne alguns exemples; també per col·laborar amb les persones en tasques de transport d'objectes pesants o de muntatge.

Hem abordat aquestes dues activitats de col·laboració persona-robot en un treball conjunt amb l'Istituto Italiano di Tecnologia (Rozo *et al.*, 2016), on proposem un marc general d'aprenentatge per demostració de tasques que requereixen la coordinació de forces entre el robot i l'usuari. En la fase d'entrenament, una persona ensenya al robot per guiatge cinestèsic com s'ha de comportar per ajudar l'usuari a transportar un moble o a muntar-lo, deixant-se portar o aplicant força quan cal. El mètode combina aprenentatge probabilístic, sistemes dinàmics i estimació de rigidesa per codificar el comportament del robot al llarg de la tasca. Aquest comportament inclou no només les trajectòries subjacents a l'activitat, sinó també el control de la impedància. Els resultats mostren que el mètode modifica amb èxit la impedància del robot al llarg de l'execució de la tasca per facilitar la col·laboració, i fa que els comportaments rígid i acomodatiu s'adaptin paral·lelament a les accions de l'usuari.

En el nostre grup s'ha utilitzat, també, guiatge cinestèsic i aprenentatge per demostració per instruir un manipulador robòtic a donar menjar (Colomé i Torras,

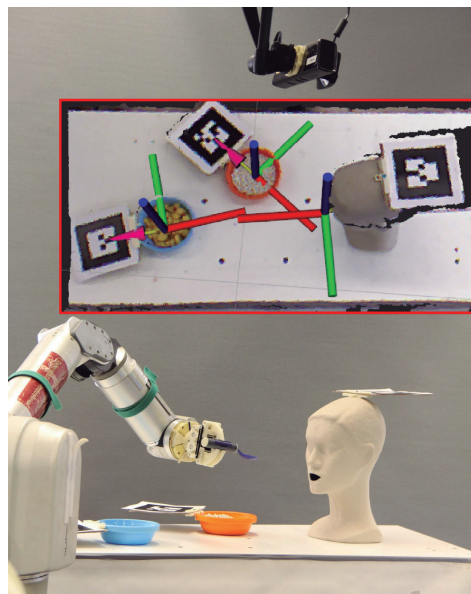


FIGURA 3. Escenari en què s'ensenya al robot a donar menjar mitjançant guiatge cinestèsic i aprenentatge per demostració. En el requadre vermell es mostra la imatge que capta la càmera zenital i la localització dels plats i la boca del maniquí.

FONT: Colomé i Torras, 2018b.

2018b) i per ensenyar a un robot bimanual a plegar peces de roba. L'escenari utilitzat en l'aplicació de donar menjar es mostra en la figura 3. Mitjançant guiatge cinèsic s'ensenyà al braç robòtic a agafar menjar amb cullera del plat taronja i a punxar-lo amb forquilla del plat blau i portar-lo a la boca del maniquí. Atès que el robot aprèn els moviments de manera contextualitzada, en la fase d'execució, serà capaç de generalitzar correctament per a diferents posicions dels plats i del maniquí. Resulta molt fàcil, doncs, per a qualsevol persona ensenyar aquesta habilitat al robot.

En el cas de plegar peces de roba, com que el guiatge és difícil i les demostracions no resulten tan precises com caldria, el robot ha de passar per un període d'entrenament en què anirà millorant la seva destresa mitjançant aprenentatge per reforçament, com s'exposa en la secció 5.5.

### 5.3. Personalització

Com esmentava abans, la personalització es pot realitzar construint un model de l'usuari a partir de les seves dades i anant-lo refinant amb les interaccions. En el cas d'aplicacions informàtiques, es tenen en compte sobretot les preferències de l'usuari pel que fa als seus interessos i a la manera de comunicar-se. Quan es tracta d'un robot que ha d'interaccionar físicament amb la persona, cal tenir en compte, també, altres preferències de tipus físic, com distàncies i velocitats d'interacció, així com les limitacions de moviment que pugui tenir l'usuari, especialment en l'entorn assistencial.

Moltes persones grans tenen dificultats per posar-se les sabates i guanyarien autonomia si un mecanisme les ajudés a fer-ho. Però cada usuari té les seves particularitats —necessitats, limitacions, gustos— i el mecanisme s'hi ha de poder adaptar. Amb aquest objectiu, a Canal *et al.* (en premsa) hem proposat un mètode basat en la planificació simbòlica adaptativa de la seqüència d'accions (tant de moviment com de comunicació amb l'usuari) per personalitzar la tasca de posar sabates mitjançant un braç robòtic (figura 4). Amb un sistema d'inferència difusa (*fuzzy*), es construeix un model d'usuari a partir de les respostes que dona a unes simples preguntes, i després s'integra en el domini de planificació. L'adaptació persegueix tant l'acompliment de la tasca com la satisfacció de l'usuari, i es duu a terme mitjançant un sistema de penalitzacions variables que s'apliquen a les regles del planificador. Els resultats mostren una adaptació ràpida del robot, fins i tot quan el comportament de l'usuari canvia o s'ha partit d'una inferència incorrecta del model inicial d'usuari.

La personalització també es pot realitzar a nivell subsimbòlic per adaptar no ja una seqüència d'accions, sinó la manera com s'executa una d'aquestes accions, sigui una trajectòria, un moviment de la pinça o les accions d'agafar, arrossegat i deixar anar. Vam desenvolupar un mètode d'aquest tipus (Canal *et al.*, 2016) per a



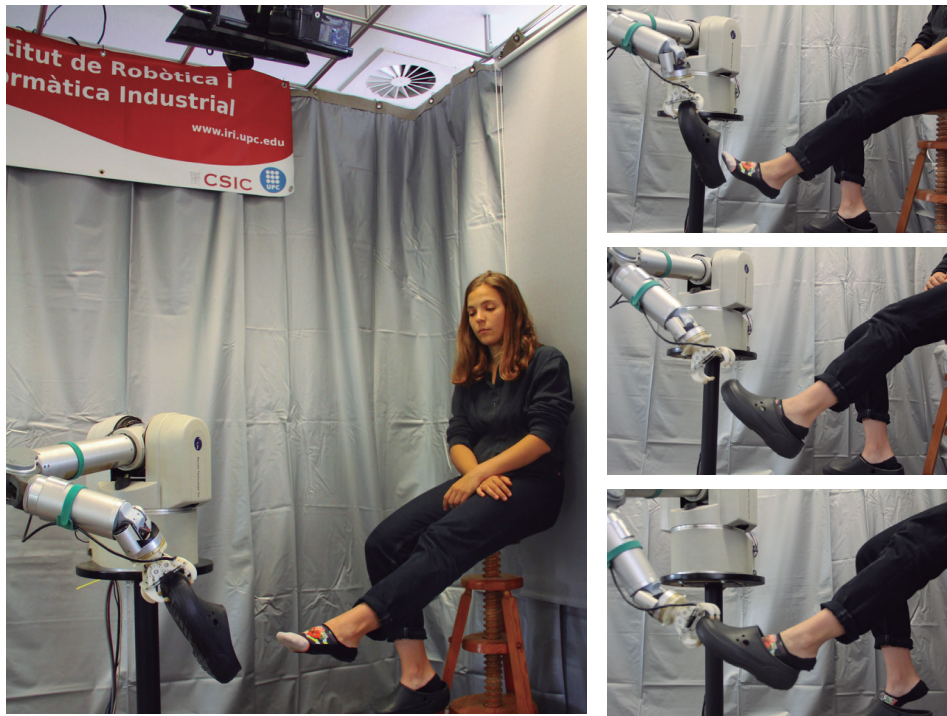


FIGURA 4. Escenari de l'aplicació en què el braç robòtic posa sabates de manera personalitzada, després d'haver generat i refinat un model de l'usuari.

FONT: Canal *et al.*, en premsa.

la tasca de donar menjar. Suposant que, a la llarga, els robots vindran de fàbrica amb un repertori d'habilitats, el repte és aconseguir que una persona sense formació tècnica en l'àmbit de la robòtica —per exemple, una persona cuidadora— pugui adaptar aquestes habilitats a les necessitats i els gustos de l'usuari. El nostre mètode està basat en aprenentatge per demostració i requereix que, quan el robot duu a terme la tasca, la persona cuidadora modifiqui la posició, la velocitat i/o l'acceleració de la trajectòria en el sentit desitjat (figura 5). El moviment i la seva variància al llarg del temps es codifiquen amb una primitiva probabilística de moviment (*probabilistic movement primitive*, ProMP) (Paraschos *et al.*, 2013), que s'ha demostrat adequada per capturar els paràmetres rellevants per realitzar la tasca correctament.

En el marc del projecte SOCRATES i en col·laboració amb la Fundació ACE, també hem personalitzat la interacció amb el robot en l'aplicació d'un test cognitiu. El Syndrom Kurztest (SKT) és utilitzat en la pràctica clínica per detectar, ava-

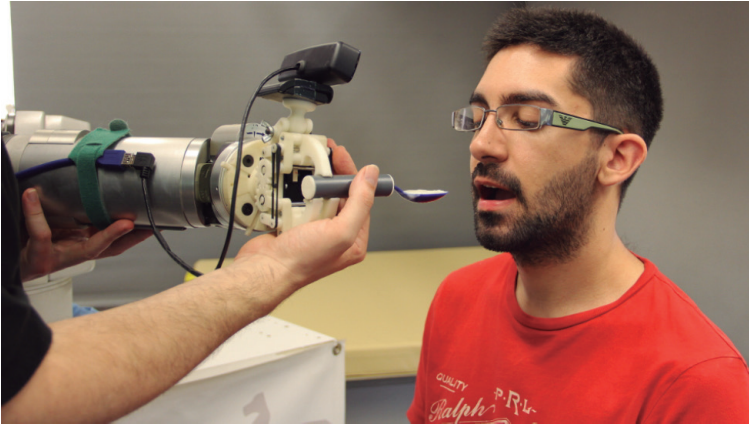


FIGURA 5. Un assistent humà modifica la manera com un braç robòtic dona menjar per adaptar-la a les preferències i limitacions d'un usuari concret.  
FONT: Web de l'IRI.

luar i quantificar deficiències cognitives, i a Andriella *et al.* (2018) l'hem adaptat perquè pugui ser aplicat per un braç robòtic. S'han proposat dos circuits d'interacció. Inicialment, el robot interactua amb la persona cuidadora per tal de fixar l'objectiu de l'exercici i establir el model inicial de deficiències mentals i físiques del pacient. Això configura el comportament del robot basant-se en les modalitats d'interacció prefixades per, posteriorment, en interacció amb el pacient, adaptar les seves accions per motivar-lo i ajudar-lo a completar l'exercici. Els resultats experimentals mostren no sols que el robot és capaç d'adaptar-se a les respostes variades dels usuaris i proporcionar-los suport i assistència en els diferents nivells d'interacció, sinó també que la interacció inicial amb la persona cuidadora proporciona una personalització més ràpida i eficaç.

#### 5.4. Seguretat

El tema de la seguretat en les dades i el programari va ser àmpliament tractat en el discurs de presentació de Josep Domingo-Ferrer com a membre de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'IEC (2016); aquí em centraré en els procediments necessaris perquè els robots que fan tasques en entorns humans siguin físicament segurs per a les persones. Es tracta de dissenyar estratègies de control de la interacció que permetin als robots seguir, entendre i predir els moviments humans en temps real, i reaccionar-hi en conseqüència. Amb aquesta finalitat, De Luca i Flacco (2012) van proposar una arquitectura jeràrquica de control estructurada en tres capes: per a la col·laboració activa, la coexistència i la seguretat. A la capa superior,

cal distingir entre una col·lisió accidental i un contacte intencionat d'un usuari humà per demanar la col·laboració del robot. La coexistència d'humans i robots en un mateix espai requereix la monitorització de l'àrea de treball mitjançant sensors externs i mètodes eficients de prevenció de col·lisions basats en la informació proporcionada per aquests sensors. Malgrat aquestes mesures de control, es poden produir contactes físics inevitables en qualsevol part del cos del robot, que han de ser detectats de manera fiable i desencadenar una reacció ràpida del robot, preferiblement basada només en senyals provinents dels sensors propioceptius.

En el grup RobIRI hem desenvolupat una tècnica per estimar les forces externes exercides sobre un manipulador en moviment que està basada només en mesures propioceptives, és a dir, evita l'ús de sensors tàctils o de força (Colomé *et al.*, 2013). Aquesta tècnica s'ha utilitzat conjuntament amb un controlador que té en compte les forces de fricció per tal d'aprendre, utilitzant aprenentatge per reforçament, tasques crítiques per a la seguretat de les persones —com la d'ajudar-les a vestir-se—, de manera que el robot es comporti dòcilment però sense deixar de seguir la trajectòria necessària per a complir la tasca.

Programar un robot perquè es comporti dòcilment requereix un equilibri entre precisió i seguretat, ja que augmentar la precisió del robot (en general, amb un terme alt de compensació de l'error) fa que el seu moviment sigui més rígid i, per tant, més perillós per als éssers humans que hi siguin a prop. Aquest equilibri s'aconsegueix mitjançant controladors de força o impedància basats en un model dinàmic invers del robot, que relaciona la posició, la velocitat i l'acceleració amb els parells que actuen sobre el robot. Tanmateix, la majoria de mètodes per construir un model d'aquest tipus no tenen en compte la possibilitat que hi hagi histèresi en la fricció, com succeeix en robots com el Whole Arm Manipulator (WAM), de Barrett Technology, de què disposem al Laboratori de Percepció i Manipulació de l'IRI. Per aquesta raó, vam derivar un model analític de fricció per a les set articulacions del robot, els paràmetres del qual es poden ajustar automàticament per a cada robot en particular (Colomé *et al.*, 2015). Això permet al robot seguir dòcilment trajectòries de referència en tot l'espai de treball.

Els resultats experimentals demostren que, utilitzant aquest model dinàmic que té en compte la fricció en l'aprenentatge per reforçament dels paràmetres de primitives de moviment dinàmic (*dynamic movement primitives*, DMP), el robot és capaç d'aprendre tasques senzilles d'ajuda a vestir, com posar una bufanda, una gorra o les sabates, a una persona de manera segura.

### **5.5. Millora per reforçament**

Aprendre habilitats més elaborades (per exemple, les que impliquen dinàmiques complexes) només a partir de demostracions pot resultar molt lent o fins i

tot impossible. Per tant, s'ha suggerit de fer servir una demostració per inicialitzar una determinada habilitat del robot i, a continuació, explorar-ne lleugeres modificacions en un espai de paràmetres per tal de millorar-la mitjançant aprenentatge per reforçament (Sutton i Barto, 1998). Aquesta és l'estratègia que hem fet servir per ensenyar a dos braços robòtics a plegar un polo en un sol moviment a l'aire sense deixar-lo anar i agafar-lo repetidament per altres punts (figura 6). A partir d'una demostració aproximada, el robot s'exercita en la tasca mentre és monitoritzat per una càmera zenital i se n'avalua l'execució mitjançant una funció de cost que mesura com de ben plegat queda el polo. S'aplica, aleshores, un algorisme d'aprenentatge per reforçament que cerca la millor política (*policy search algorithm*) de plegament de roba per part del robot (Colomé i Torras, 2018a).

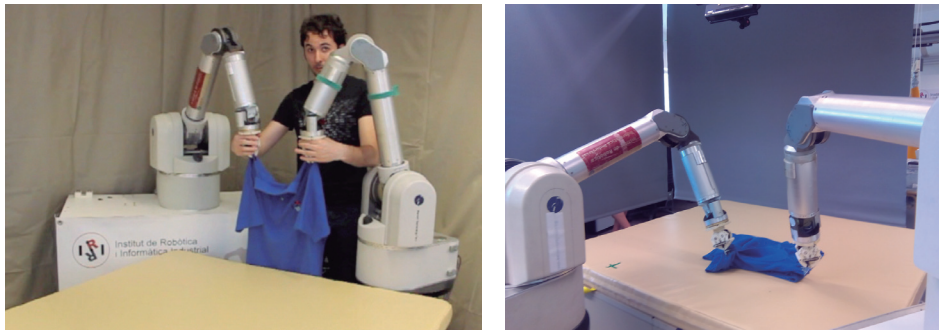


FIGURA 6. Escenari experimental de la tasca d'ensenyar a un robot bimanual a plegar peces de roba —en aquest cas, un polo— mitjançant una demostració inicial (fotografia de l'esquerra) seguida d'aprenentatge autònom per reforçament (fotografia de la dreta).

FONT: Colomé i Torras, 2018a.

La dificultat radica a escalar els algorismes d'aprenentatge per reforçament a espais continus d'elevada dimensió com són els que caracteritzen el moviment dels robots manipuladors o, més general encara, dels robots humanoides. Per superar aquesta dificultat, s'han proposat diverses maneres de parametritzar primitives de moviment junt amb procediments d'aprenentatge de polítiques eficients (Peters i Schaal, 2008), així com estratègies per reduir la dimensió de l'espai de paràmetres on cal fer l'exploració (Colomé i Torras, 2018a).

## 5.6. Millora en la planificació

Les tasques de manteniment d'aparells i reciclatge de productes electrònics abordades en els projectes INTELLACT i IMAGINE impliquen no ja una única

habilitat, sinó seqüències d'accions en entorns no predefinitos i, per tant, requereixen capacitats de planificació. Per desenvolupar-les, una arquitectura cognitiva (Vernon *et al.*, 2007) ha de ser capaç d'aprendre progressivament un model d'acció a partir d'experiències i assajar escenaris futurs hipotètics mitjançant aquest model, per tal de determinar la millor manera d'actuar. D'altra banda, el model d'acció ha de ser probabilístic per tenir en compte el soroll en les percepcions i la incertesa en el resultat de les accions.

Amb aquest objectiu s'ha desenvolupat l'extensió relacional de l'aprenentatge per reforçament. En afegir representacions relacionals dels estats i les accions (és a dir, codificant explícitament les relacions en una estructura de dades simbòlica), els coneixements adquirits es poden generalitzar a diferents estats i transferir-se d'una tasca a d'altres (Martínez *et al.*, 2017b).

Algunes accions del robot poden ser irreversibles i provocar fallades irrecuperables (per exemple, danys en el robot, el trencament d'un objecte o la pèrdua d'una eina). Per contra, un planificador sempre pot fer marxa enrere en arribar a un carreró sense sortida i tractar de trobar una seqüència alternativa d'accions per aconseguir l'objectiu. D'aquesta manera, les experiències prèvies poden ser molt útils per a la planificació de seqüències de moviments que afavoreixin l'acompliment segur de la tasca.

Hem proposat un mètode relacional d'aprenentatge per reforçament que permet a un robot raonar sobre els carrerons sense sortida i les seves causes. Si detecta que un pla hi podria conduir, el robot tracta de trobar un pla segur alternatiu i, si no en troba cap, pregunta a l'usuari si ha d'executar l'acció arriscada o si ell pot proporcionar-li una nova via. Aquest mètode permet aprendre polítiques segures d'actuació, minimitzar els errors irrecuperables durant el procés d'aprenentatge i tenir en compte els canvis en l'entorn no provocats pel robot —els anomenats *efectes exògens (exogenous effects)*— (Martínez *et al.*, 2017a). A més, cal destacar que incloure els humans en el circuit accelera l'aprenentatge i l'execució (Agostini *et al.*, 2017).

## 6. IMPLICACIONS ÈTIQUES

El fet que, com exposàvem en la secció 4, les xarxes i els robots hagin esdevingut «socials» planteja també reptes de caire ètic i sociològic, que han propiciat una confluència necessària amb les humanitats.

### 6.1. Oportunitats i perills de les xarxes socials i les aplicacions interactives

Un influenciador (*influencer*) és aquell capaç d'influir en el procés de decisió d'una altra persona. Es pot influir sobre la gent per obtenir poder i, viceversa, es

pot utilitzar el poder per influenciar. Internet ha suposat un gran canvi en les pautes de persuasió, ja que ha multiplicat les possibilitats d'influència posant-la alhora a l'abast de qualsevol persona.

Els influenciadors han esdevingut creadors d'opinió poderosos, de vegades amb conseqüències negatives, com la propagació de notícies falses i la introducció de biaixos en processos electorals. És possible regular la seva capacitat d'influència sense atemptar contra la llibertat d'expressió? Sovint ens sentim manipulats pels anuncis personalitzats amb què ens bombardegen tota mena d'aplicacions, però els lliurem còndidament els nostres perfils. En especial els joves, que massa vegades no són conscients dels possibles mals usos de la informació que comparteixen a les xarxes, que pot ser utilitzada per a l'assetjament escolar, per a xantatges i intimidacions, o senzillament pot jugar en contra seva a l'hora de buscar feina. La majoria d'atacs informàtics i amenaces a les xarxes es fan des de l'anonimat i, és clar, tenen un abast molt superior al que podria donar-se en el món físic.

Però aquests perills no ens han de fer desistir d'aprofitar les immenses possibilitats que ofereixen les xarxes (per exemple, per al treball col·laboratiu). Pensem en els bancs de temps en què professionals diversos bescanvien els seus serveis, o en la millora del traductor de Google aprofitant les correccions introduïdes pels mateixos usuaris. També són destacables els jocs d'impacte social com l'Evolve,<sup>7</sup> que, utilitzant un còmic com a fil argumental, insta els jugadors a completar desafiaments com la lluita contra la fam al món, l'ús d'energies renovables, la potenciació del paper de la dona o un pla d'accés igualitari a l'aigua potable. Altres jocs d'aquest tipus són A Force More Powerful,<sup>8</sup> en què els jugadors s'han d'empescar estratègies de resistència passiva per superar situacions d'opressió en una comunitat, o Participatory Chinatown,<sup>9</sup> que pretén ajudar els residents d'aquest districte de Boston a millorar el desenvolupament futur del seu veïnat.

Tanmateix, la majoria de videojocs busquen només l'entreteniment sense apellar a l'interès genuí dels jugadors per resoldre problemes. Atès el gran nombre d'hores que es passen jugant, no és estrany que sorgís la idea de treure'n rendiment. Ahn i Dabbish (2008) van ser els primers a dissenyar jocs atractius que, com a subproducte, solucionaven problemes o generaven dades que permetien entrenar algorismes d'aprenentatge automàtic. Un exemple és el joc ESP,<sup>10</sup> que és a la base de l'etiquetatge d'imatges de Google. Aquest tipus de jocs, batejats com a

7. <http://www.urgentevoke.com>.

8. <https://www.nonviolent-conflict.org>.

9. <https://elab.emerson.edu/projects/participatory-chinatown>.

10. <https://web.archive.org/web/20090106145854/http://espgame.org>.

jocs amb propòsit, han donat lloc a la ludificació (*gamification*) tan estesa avui. En aquest àmbit sorgeix la pregunta de si és èticament acceptable dissenyar jocs o qualsevol tecnologia amb l'objectiu de crear addicció i treure'n profit.

Si tradicionalment l'evolució tecnològica ja anava sovint per davant de l'anàlisi de les seves implicacions socials, ara que les innovacions són constants i s'integren en un tancar i obrir d'ulls en la quotidianitat, podríem dir que estem assistint en temps real a un experiment d'abast mundial, sense estudi previ. És difícil predir, de manera fonamentada, la influència que la hiperconnectivitat i la creixent interacció amb màquines tindran tant en l'evolució de la societat i de l'economia com en la vida de les persones. Per això, quan s'intenta establir un debat ètic, sovint es recorre a la ciència-ficció. Si no es disposa de models acurats que permetin fer prediccions fiables, una opció raonable és imaginar diferents escenaris futurs possibles i discutir-ne els pros i els contres per formar-nos en un criteri ben argumentat.

Hi ha diverses obres de ficció que tracten amb encert qüestions de caire afectiu, psicològic i social lligades a la tecnologia informàtica, i n'afavoreixen la discussió (figura 7). Destacaria la sèrie *Black mirror* —amb capítols independents dedicats, cadascun, a portar a l'extrem els perills d'una determinada tecnologia informàtica—, la pel·lícula *Her* —en què un home s'enamora del sistema operatiu del seu ordinador— i la novel·la *The lifecycle of software objects* (Chiang, 2010) —en la qual s'exposen les dificultats per cuidar i mantenir al dia una mascota informàtica—, per esmentar-ne algunes. Jo també he volgut contribuir al debat amb la novel·la *Enxarxats* (Torras, 2017a), que toca temes com les estratègies de

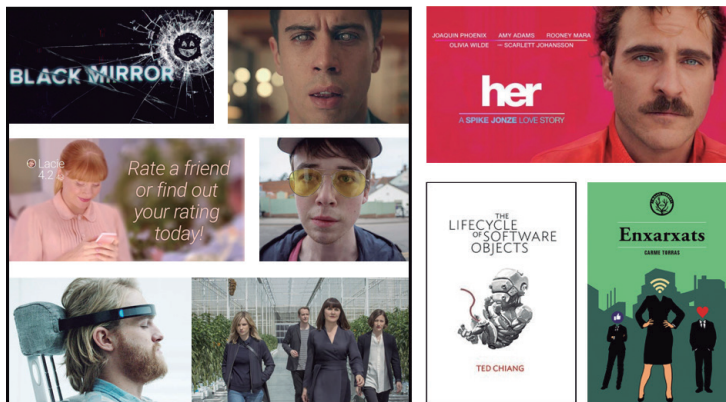


FIGURA 7. Exemples d'obres de ficció que tracten qüestions ètiques suscitades per la tecnologia informàtica.

FONT: Elaboració pròpia.

persuasió que apliquen els influenciadors, la utilització de robots com a mestres de reforç a l'aula, el disseny de jocs d'ordinador amb impacte cívic o la creació d'un avatar que compili les nostres contribucions a la xarxa i ens garanteixi una certa immortalitat digital. A banda de la trama de ficció de la novel·la, en un apèndix s'inclouen enllaços a webs i resums d'articles per als lectors que en vulguin saber més.

En conjunt, són eines que tenim a l'abast i que, en poc temps, poden capgirar la reputació d'una persona, transformar un barri, modificar el mercat de treball i les relacions no només laborals, sinó també familiars i afectives, o canviar el que s'entén per l'herència que deixa una persona en morir. Cal tenir present que cada contribució nostra a la xarxa té una repercussió i que els programes que aprenen de les persones, com el traductor esmentat abans, traslladen dels programadors als usuaris la responsabilitat del seu bon o mal funcionament. En aquest sentit, és reveladora l'experiència que va dur a terme Microsoft de posar a Twitter el bot de conversa Tay, basat en tècniques d'aprenentatge automàtic, i que en menys de vint-i-quatre hores va haver de retirar pels seus comentaris racistes i misògins, que havia après conversant amb humans en un xat (Hunt, 2016).

## **6.2. *Roboètica: confluència de la robòtica amb les humanitats***

Com hem exposat en la secció 5, el gran repte en el desenvolupament dels robots socials és proveir-los de capacitat d'aprenentatge perquè es puguin adaptar a usuaris diversos i entorns canviant, així com fer front a situacions imprevistes. Els avenços en aquesta direcció donaran lloc, sens dubte, a robots més útils i versàtils, però al seu torn intensificaran el debat sobre si s'ha de dotar els robots de més autonomia i capacitat per prendre decisions, no només en contextos crítics com el militar i el mèdic, sinó també en els àmbits assistencial i educatiu. Per exemple, un ancià amb un lleu deteriorament cognitiu podria creure que el robot que el cuida es preocupa realment pel seu benestar i delegar-li totes les decisions, o un nen massa aferrat al seu company robòtic podria no desenvolupar l'empatia.

Per abordar aquest tipus de qüestions, la comunitat robòtica s'ha apropat a les humanitats i s'han posat en marxa nombroses iniciatives en dues grans àrees: la regulació legal i l'educació ètica. Pel que fa a la primera, institucions com el Parlament Europeu, el South Korean Robot Ethics Charter, la IEEE Standards Association o la British Standards Institution estan elaborant normatives per a dissenyadors, programadors i usuaris de robots.

La via de l'educació ètica és d'ampli espectre i abasta des de textos per a estudiants de secundària fins a cursos en línia per al gran públic, passant per materials per a l'actualització dels professionals i, sobretot, llibres i articles per a formació universitària. Associacions tan prestigioses com l'Institute of Electrical and Elec-



tronics Engineers (IEEE) i l'Association for Computing Machinery (ACM) inclouen en els plans d'estudis per a les carreres d'enginyeria i informàtica una assignatura d'ètica aplicada a la tecnologia, en què cada vegada més es tracten temes d'ètica en robòtica, una matèria que s'ha batejat com *roboètica* (Veruggio *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2011). Els aspectes més debatuts són els que afecten els àmbits militar i mèdic, juntament amb els de privacitat, responsabilitat legal i fractura digital. Les qüestions de caire afectiu, psicològic i social, com les esmentades més amunt, només ara es comencen a plantejar a causa de l'auge de la robòtica assistencial.

També aquí, com abans en l'àmbit d'Internet i les xarxes socials, quan s'intenta establir un debat ètic o impartir un curs, sovint es recorre a la ciència-ficció. Alguns dels temes abordats en les obres clàssiques d'Asimov, Dick o Bradbury, com les tres lleis de la robòtica, les mainaderes mecàniques o les rèpliques humanoides, han cobrat actualitat amb el desenvolupament dels robots socials. També pel·lícules i sèries recents permeten debatre temes de roboètica i són utilitzades en cursos, tant en línia com presencials (figura 8). Voldria destacar la sèrie *Real humans* —en què robots d'aparença gairebé humana conviuen amb les persones i sovint entren en competència amb elles—, la pel·lícula *Surrogates* —en què cada ciutadà té un avatar que controla des de casa i a través del qual es belluga per la ciutat i es relaciona amb altres persones—, així com la novel·la *The windup girl* (Bacigalupi, 2009) —en la qual un robot adquireix consciència que ha estat construït per servir les persones i es pregunta pels seus drets i deures. La pel·lícula *Robot and Frank* —que mostra la relació entre un home gran, en Frank, i el seu robot cuidador— mereix una menció especial pel seu realisme i valor pedagògic, i ha servit de base per a un curs en línia al web *Teach with movies*, entre d'altres.



FIGURA 8. Exemples d'obres de ficció que tracten qüestions ètiques suscitades pels robots socials.

FONT: Elaboració pròpia.

En el context de l'ensenyament universitari, la meua novel·la *La mutació sentimental* (Torras, 2008) ha estat traduïda a l'anglès amb el títol *The vestigial heart* (Torras, 2018) i publicada juntament amb uns materials ètics per impartir el curs *Ètica en robòtica social i intel·ligència artificial*. L'objectiu és proporcionar directius útils per a estudiants i professionals (dissenyadors de robots, fabricants i programadors), així com per als usuaris finals i el públic en general. Es tracten sis grans temes: com dissenyar l'assistent «perfecte», la importància de l'aparença i la simulació d'emocions per a l'acceptació dels robots, la robotització en l'àmbit laboral i en l'educatiu, el dilema entre la presa de decisions automàtica i la llibertat i dignitat humanes, i la responsabilitat civil relacionada amb la programació d'una «moral» en els robots. L'elaboració de cada tema està basada en escenes de la novel·la, que tracta d'una societat futura en què cada persona té el seu assistent robòtic i on recobra la vida una adolescent de la nostra època a qui criegenitzaren perquè patia una malaltia incurable. El conflicte amb els humans futurs que han estat criats per mainaders artificials, han après de mestres robòtics i comparteixen treball i oci amb humanoides està servit.

## 7. CONCLUSIÓ

Les noves tecnologies informàtiques i robòtiques d'interacció amb les persones en els seus entorns quotidians plantegen tot un seguit de reptes, tant d'investigació tecnocientífica com d'humanitats i ciències socials, que constitueixen temes candents, de gran actualitat i amb un elevat potencial per marcar el futur.

Pel que fa a la investigació tecnocientífica, a més del progrés incremental de les tècniques d'aprenentatge en els diferents àmbits descrits, preveiem dos avenços fonamentals que milloraran no només la comunicació persona-màquina, sinó també la col·laboració persona-robot en el món físic. En la tecnologia informàtica, la comprensió semàntica de les situacions permetrà un nivell de raonament i d'explicació de les raons subjacents a la presa de decisions automàtica, que actualment està fora de l'abast i limita l'aplicabilitat de tècniques com, per exemple, l'aprenentatge profund. En robòtica, la modelització per part del robot de les seves pròpies capacitats (que podríem denominar *autoconeixement*) serà un ingredient clau per augmentar significativament la seva autonomia durant els pròxims anys.

Aquests avenços, sens dubte, donaran lloc a aplicacions informàtiques d'elevat rendiment i a robots més versàtils, però al seu torn comportaran nous problemes i, en particular, intensificaran el debat sobre si s'ha de dotar els programes de més capacitat per prendre decisions i els robots de més autonomia, sobretot en contextos crítics com el militar.

En definitiva, les tecnologies informàtiques i robòtiques orientades a la interacció amb les persones constitueixen un àmbit extraordinàriament prometedor,

que està donant un gran impuls a la investigació tecnocientífica, mentre que, al mateix temps, plantegen qüestions decisives que propicien un emocionant debat social i ètic.

## AGRAÏMENTS

Vull agrair la formació i el suport rebuts del professor Michael A. Arbib, que em va obrir les portes no sols del seu laboratori a la Universitat de Massachusetts, sinó també del fascinant món de la recerca a la frontera de la informàtica i les neurociències. També als professors Gabriel Ferraté, Josep Amat, Luis Basañez i Rafael Huber, per donar-me l'oportunitat de treballar en robòtica i intel·ligència artificial a l'Institut de Cibernètica i, posteriorment, a l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC. Vull destacar tot el que he après dels meus exdoctorands, en particular dels doctors Federico Thomas, Vicente Ruiz de Angulo i Guillem Alenyà, els meus coautors més sovintejats, així com de tots i cadascun dels integrants del grup Percepció i Manipulació Robotitzada, que tinc el privilegi de coordinar.

També dec als successius directors de l'Institut que hagin creat l'ambient propici perquè em pogués centrar en la recerca, i al personal d'administració i serveis, que dia a dia breguin amb la burocràcia per simplificar-nos la feina. Vull esmentar, també, els companys de l'Associació Catalana d'Intel·ligència Artificial i de l'Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial, amb el seu director Ramon López de Mántaras al capdavant, dels quals sempre he rebut un gran suport i una col·laboració molt generosa. A tots ells, als companys passats i presents, i als nombrosos investigadors —nacionals i internacionals— amb qui he col·laborat i continuaré col·laborant, moltes gràcies!

I no dono les gràcies a la família i als amics més propers perquè seria com donar-me-les a mi mateixa, ja que sou part de mi.

## REFERÈNCIES

- AGOSTINI, A.; TORRAS, C.; WÖRGÖTTER, F. (2017). «A general strategy for interactive decision-making in robotic platforms». *Artificial Intelligence Journal*, vol. 247: *AI and robotics*, p. 187-212.
- AHN, L. von; DABBISH, L. (2008). «Designing games with a purpose». *Communications of the ACM*, vol. 51 (8), p. 58-67.
- AITopics: An Official Publication of the AAAI*. <<http://aitopics.org/topic/machine-learning>>.
- ALENYÀ, G.; FOIX, S.; TORRAS, C. (2014). «Using ToF and RGBD cameras for 3D robot perception and manipulation in human environments». *Intelligent Service Robotics*, vol. 7 (4), p. 211-220.

- ANDRIELLA, A.; ALENYÀ, G.; HERNÁNDEZ-FARIGOLA, J.; TORRAS, C. (2018). «Deciding the different robot roles for patient cognitive training». *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 117, p. 20-29.
- ARBIB, M. A. (ed.) (2002). *Handbook of brain theory and neural networks*. 2a ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- BACIGALUPI, P. (2009). *The windup girl*. Nova York: Night Shade Books.
- BILLARD, A.; CALINON, S.; DILLMANN, R.; SCHAAL, S. (2008). «Robot programming by demonstration». A: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). *Springer handbook of robotics*. Berlín: Springer, p. 1371-1394.
- CANAL, G.; ALENYÀ, G.; TORRAS, C. (2016). «Personalization framework for adaptive robotic feeding assistance». A: *8th International Conference on Social Robotics: Lecture notes in artificial intelligence*. Berlín: Springer, p. 22-31.
- (en premsa). «Adapting robot task planning to user preferences: an assistive shoe dressing example». *Autonomous Robots*.
- CHIANG, T. (2010). *The lifecycle of software objects*. Michigan: Subterranean Press.
- COLOMÉ, A.; PARDO, D.; ALENYÀ, G.; TORRAS, C. (2013). «External force estimation during compliant robot manipulation». A: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Alemanya, Karlsruhe). IEEE, p. 3535-3540.
- COLOMÉ, A.; PLANELL, A.; TORRAS, C. (2015). «A friction-model-based framework for reinforcement learning of robotic tasks in non-rigid environments». A: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Estats Units, Seattle). IEEE, p. 5649-5654.
- COLOMÉ, A.; TORRAS, C. (2018a). «Dimensionality reduction for dynamic movement primitives and application to bimanual manipulation of clothes». *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34 (3), p. 602-615.
- (2018b). «Dimensionality reduction in learning Gaussian mixture models of movement primitives for contextualized action selection and adaptation». *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3 (4), p. 3922-3929.
- CORONA, E.; ALENYÀ, G.; GABÁS, A.; TORRAS, C. (2018). «Active garment recognition and target grasping point detection using deep learning». *Pattern Recognition*, vol. 74, p. 629-641.
- CUSUMANO-TOWNER, M.; SINGH, A.; MILLER, S.; O'BRIEN, J. F.; ABBEEL, P. (2011). «Bringing clothing into desired configurations with limited perception». A: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Xina, Xangai). IEEE, p. 3893-3900.
- DE JONG, K. A. (2006). *Evolutionary computation: A unified approach*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- DE LUCA, A.; FLACCO, F. (2012). «Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration». A: *2012 4<sup>th</sup> IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* (Itàlia, Roma). IEEE, p. 288-295.
- DOMINGO-FERRER, J. (2016). *Privadesa en temps de megadades: entre el nihilisme i el fonamentalisme*. Discurs de presentació com a membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans. Barcelona: IEC.
- DOUMANOGLU, A.; KARGAKOS, A.; KIM, T.-K.; MALASSIOTIS, S. (2014). «Autonomous active recognition and unfolding of clothes using random decision forests and probabilistic planning». A: *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Xina, Hong Kong). IEEE, p. 987-993.
- GOLDBERG, D. E. (2006). *Genetic algorithms*. Pearson Education.

- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. (2016). *Deep learning*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- HUNT, E. (2016). «Tay, Microsoft's AI chatbot, gets a crash course in racism from Twitter». *The Guardian* (24 març). Disponible en línia a: <<https://www.theguardian.com/technology/2016/mar/24/tay-microsofts-ai-chatbot-gets-a-crash-course-in-racism-from-twitter>>.
- IEEE (2018). *Ethics in action: Global initiative on ethics of autonomous and intelligent systems* [en línia]. <<https://ethicsinaction.ieee.org/>>.
- JEVTIĆ, A.; FLORES, A.; ALENYÀ, G.; CHANCE, G.; CALEB-SOLLY, P.; DOGRAMADZI, S.; TORRAS, C. (en premsa). «Personalized robot assistant for support in dressing». *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*.
- LIN, P.; ABNEY, K.; BEKEY, G. (2011). *Robot ethics: The ethical and social implications of robotics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- LÓPEZ DE MÁNTARAS, R. (2018). *Passat, present i futur de la intel·ligència artificial: algunes reflexions*. Discurs de presentació com a membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans. Barcelona: IEC.
- MARTÍNEZ, D.; ALENYÀ, G.; RIBEIRO, T.; INOUE, K.; TORRAS, C. (2017a). «Relational reinforcement learning for planning with exogenous effects». *Journal of Machine Learning Research*, vol. 18 (1), p. 2689-2732.
- MARTÍNEZ, D.; ALENYÀ, G.; TORRAS, C. (2017b). «Relational reinforcement learning with guided demonstrations». *Artificial Intelligence Journal*, vol. 247, p. 295-312.
- MITCHELL, T. M. (2006). «The discipline of machine learning». Technical Report CMU-ML-06-108, Machine Learning Department, School of Computer Science, Carnegie Mellon University. Disponible en línia a: <<http://www-cgi.cs.cmu.edu/~tom/pubs/MachineLearningTR.pdf>>.
- NOLFI, S.; BONGARD, J.; HUSBANDS, P.; FLOREANO, D. (2016). «Evolutionary robotics». A: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). *Springer handbook of robotics*. 2a ed. Berlín: Springer, p. 2035-2068.
- PARASCHOS, A.; NEUMANN, G.; DANIEL, C.; PETERS, J. (2013). «Probabilistic movement primitives». *Neural Information Processing Systems*, vol. 26, p. 2616-2624.
- PETERS, J.; SCHAAL, S. (2008). «Reinforcement learning of motor skills with policy gradients». *Neural Networks*, vol. 21 (4), p. 682-697.
- PIAGET, J. (1977). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. París: Delachaux et Niestlé.
- RAMISA, A.; ALENYÀ, G.; MORENO-NOGUER, F.; TORRAS, C. (2014). «Learning RGB-D descriptors of garment parts for informed robot grasping». *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 35, p. 246-258.
- (2016). «A 3D descriptor to detect task-oriented grasping points in clothing». *Pattern Recognition*, vol. 60, p. 936-948.
- ROZO, L.; CALINON, S.; CALDWELL, D.; JIMÉNEZ, P.; TORRAS, C. (2016). «Learning physical collaborative robot behaviors from human demonstrations». *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32 (3), p. 513-527.
- ROZO, L.; JIMÉNEZ, P.; TORRAS, C. (2013). «A robot learning from demonstration framework to perform force-based manipulation tasks». *Intelligent Service Robotics*, vol. 6 (1), p. 33-51.
- SAVARIMUTHU, T. R.; BUCH, A. G.; SCHLETTE, C.; WANTIA, N.; ROSSMANN, J.; MARTÍNEZ, D.; ALENYÀ, G.; TORRAS, C.; UDE, A.; NEMEC, B.; KRAMBERGER, A.; WÖRGÖT-

- TER, F.; AKSOY, E. E.; PAPON, J.; HALLER, S.; PIATER, J.; KRÜGER, N. (2018). «Teaching a robot the semantics of assembly tasks». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48 (5), p. 670-692.
- SIMÓ-SERRA, E.; TORRAS, C.; MORENO-NOGUER, F. (2017). «3D human pose tracking priors using geodesic mixture models». *International Journal of Computer Vision*, vol. 122 (2), p. 388-408.
- SIMON, H. A. (1969). *The sciences of the artificial*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- SUTTON, R. S.; BARTO, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. [2a ed., 2012. Disponible en línia a: <<https://www.dropbox.com/s/f4tnuhipchpkgoj/book2012.pdf>>]
- TARANOVIC, A.; JEVTIC, A.; TORRAS C. (en premsa). «Adaptive modality selection algorithm in robot-assisted cognitive training». A: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Madrid).
- TORRAS, C. (2008). *La mutació sentimental*. Lleida: Pagès.
- (2017a). *Enxarxats*. Barcelona: Males Herbes.
- (2017b). «Assistent(e)s robòtic(e)s: un punt de confluència entre tecnociència i humanitats». *Quadern de les Idees, les Arts i les Lletres*, vol. 38, núm. 209, p. 19-21.
- (2018). *The vestigial heart: A novel of the robot age*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- TURING, A. (1950). «Computing machinery and intelligence». *Mind*, vol. LIX, núm. 236, p. 433-460.
- VERNON, D.; METTA, G.; SANDINI, G. (2007). «A survey of artificial cognitive systems: implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents». *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11 (2), p. 151-180.
- VERUGGIO, G.; OPERTO, F.; BEKEY, G. (2016). «Roboethics: social and ethical implications of robotics». A: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). *Springer handbook of robotics*. 2a ed. Berlín: Springer, p. 2135-2160.









