

# Robòtica

lloc: [Institut d'Ensenyaments a Distància de les Illes  
Balears](#)  
Curs: Models d'intel·ligència artificial  
Llibre: Robòtica

Imprès per: Carlos Sanchez Recio  
Data: dimarts, 24 de desembre 2024, 15:03

# Taula de continguts

## 1. Introducció

## 2. Maquinari robòtic

### 2.1. Sensors

### 2.2. Actuadors

## 3. Percepció robòtica

## 4. Planificació del moviment

## 5. Planificació del moviment amb incertesa

## 6. Moviment

## 7. Arquitectures de programari

## 8. Humans i robots

### 8.1. Coordinació

### 8.2. Aprendre el que volen els humans

## 9. Robòtica humanoide

## 10. Aplicacions

## 11. Exemples que cal saber

## 12. CoppeliaSim

### 12.1. Interfície d'usuari

### 12.2. Escenes i models

### 12.3. Objectes

### 12.4. Funcionalitat

### 12.5. Codi

### 12.6. Simulació

### 12.7. Bucle de simulació

### 12.8. Velocitat de simulació

### 12.9. Mode síncron

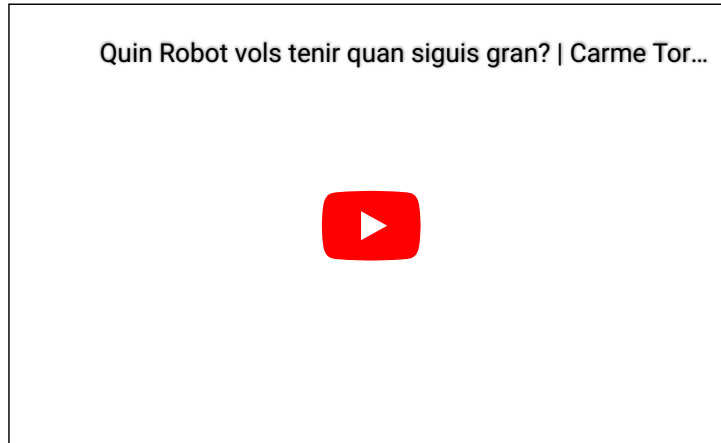
### 12.10. Tutorials

## 13. Per a saber-ne més

## 1. Introducció

La investigadora en robòtica **Carme Torras** fa en la seva xerrada TED, de març del 2021 una presentació interessant de la robòtica, en què mostra els tipus de robots, i les implicacions ètiques que planteja el seu ús social. Escoltem-la i ens donarà una primera visió panoràmica del capítol.

De què depen que es desenvolupin uns robots o d'altres? D'interessos econòmics, polítics, socials... Tenim el dret a decidir sobre els robots que volem? El filòsof Robert Solomon digué que "les relacions que establim ens modelen". Tot i que aquesta afirmació es feu en relació a les relacions interhumanes, amb l'extensió de les relacions entre persones i màquines, la frase pren una nova dimensió.



**Vídeo:** Carme Torra: Quin robot vols tenir quan siguis gran?

Els **robots** són agents físics que realitzen tasques a través de la manipulació del món físic. Per això estan equipats amb **actuadors** com ara les cames, rodes, articulacions o pinces. Els actuadors tenen un únic propòsit: aplicar forces físiques a l'entorn. Els robots també estan equipats amb **sensors**, que els permeten de percebre el seu entorn. La robòtica actual fa servir un conjunt variat de sensors, incloent-hi càmeres i làsers per mesurar l'entorn, i giroscopis i acceleròmetres per mesurar el moviment propi del robot.

La majoria de robots actuals entren dins una de les tres categories següents: **manipuladors**, **robots mòbils** i **manipuladors mòbils**.

Els **manipuladors**, o braços robòtics, estan físicament ancorats al seu lloc de treball, per exemple a una cadena de producció industrial. El moviment del manipulador normalment implica una cadena d'articulacions controlables, que permet que el robot col·loqui els seus actuadors en qualsevol posició de l'espai de treball. Els manipuladors són el tipus de robot industrial més comú, amb més d'un milió d'unitats instal·lades arreu del món. Alguns manipuladors mòbils es fan servir als hospitals per ajudar els cirurgians. Els braços robòtics tenen una gran importància en la fabricació de cotxes, i fins i tot s'han usat manipuladors per realitzar obres d'art originals.

La segona categoria és el **robot mòbil**. Aquest tipus d'agent es desplaça pel seu entorn usant rodes, cames o mecanismes semblants. S'han posat en servei per distribuir menjar als hospitals, moure contenidors als molls de càrrega, i tasques semblants. Els vehicles terrestres no tripulats circulen autònomament per carrers, autopistes i fora de camins. La NASA fa servir rovers planetaris per a l'exploració de Mart. Altres tipus de robots mòbils inclouen els vehicles aeris no tripulats, usats en vigilància, polvorització de cultius i operacions militars. Els vehicles submarins aquàtics s'usen en l'exploració profunda de la mar. També hi ha robots mòbils repartint paquets als llocs de treball i aspirant els terres domèstics.

El tercer tipus de robot combina mobilitat i manipulació, i se'n diu **manipulador mòbil**. Els robots humanoides imiten la figura humana. Els manipuladors mòbils poden aplicar els seus actuadors a una distància més gran, però la seva activitat és més complexa perquè no tenen la rigidesa de l'ancoratge dels manipuladors fixos.

El camp de la robòtica també inclou dispositius protètics (membres artificials, orelles i ulls per a humans), entorns intel·ligents (com ara un domicili tot equipat de sensors i actuadors) i sistemes multicòs, en què l'acció robòtica s'aconsegueix mitjançant eixams (*swarms*) de petits robots que col·laboren.

Els robots reals han de fer front a entorns observables només parcialment, estocàstics (no determinístics), dinàmics i continus (en oposició a discrets). Molts d'entorns robòtics són també seqüencials i multiagent. L'observació parcial i l'estocasticitat són el resultat d'actuar en un món gran i complex. Les càmeres robòtiques no hi poden veure voltant les cantonades, i les ordres de moviment estan subjectes a incertesa a causa del lliscament i la fricció dels engranatges. Al mateix temps, el món real funciona en temps real, ni més aviat ni més a poc a poc.

En un entorn simulat, es poden usar algorismes simples per aprendre en un parell d'hores de CPU a partir de milions d'interaccions. En un entorn real, podria durar anys realitzar aquestes interaccions. A més, els xocs reals provoquen danys, no com els simulats. Els sistemes robòtics pràctics han d'incorporar coneixement a priori del robot, de l'entorn i de les tasques que el robot ha de realitzar, de forma que el robot pugui aprendre aviat i actuar de forma segura.

La robòtica ajunta molts de conceptes d'intel·ligència artificial, com ara l'estimació probabilística de l'estat, la percepció, la planificació, l'aprenentatge no supervisat i l'aprenentatge per reforç. Per a alguns d'aquests conceptes la robòtica suposa un repte d'aplicació, i en d'altres cal usar les versions contínues d'algorismes discrets.

## 2. Maquinari robòtic

En el desenvolupament d'intel·ligència artificial, el programa de l'agent (*software*) dona per suposada l'arquitectura *hardware* (sensors, actuadors i processadors). Ara bé, en el món real, l'èxit dels robots depèn igualment del disseny de sensors i actuadors adequats per a la tasca que s'ha de realitzar.

## 2.1. Sensors

### Sensors

Els sensors són la interfície perceptual entre el robot i l'entorn. Els **sensors passius**, com les càmeres, són observadors de l'entorn: capturen senyals generats per altres fonts de l'entorn. Els **sensors actius**, com el sonar, envien energia a l'entorn i mesuren el seu reflex en el sensor. Els sensors actius donen més informació que no els sensors passius, a canvi d'un consum energètic més gran i un risc d'interferència quan n'hi ha diversos que s'usen simultàniament. Tant si són actius com passius, els sensors es poden classificar en tres tipus, segons si són sensibles a l'entorn, a la posició del robot o a la seva configuració interna.

Els sensors de distància mesuren la diferència entre la posició dels objectes propers i el robot. En els inicis de la robòtica, els robots solien dur sensors sonar. Els sensors sonar emeten ones sonores direccionals, reflectides pels objectes, i una part d'aquesta energia torna al sensor. L'interval de temps i la intensitat del senyal de retorn indiquen la distància dels objectes propers. El sonar és la tecnologia que fan servir els vehicles subaquàtics no tripulats.

La visió estèreo es basa en múltiples càmeres que capten l'entorn des de punts de vista lleugerament diferents, i a partir de la combinació d'aquestes imatges bidimensionals es construeix una representació tridimensional que permet situar els objectes de l'entorn. En els robots terrestres mòbils, el sonar i la visió estèreo ja s'usen rarament, a causa de la seva manca de precisió fiable.

La major part de robots terrestres estan equipats amb sensors de distància òptics. Com els sensors sonar, els sensors de distància òptics emeten senyals actius (llum) i mesuren el temps fins que una reflexió d'aquest senyal arriba al sensor. Les **càmeres de temps de vol** (*time of flight camera*) adquireixen imatges fins a 60 frames per segon. Uns altres sensors de distància fan servir feixos làser i unes càmeres especials d'un píxel que es poden dirigir usant conjunts de miralls o elements que giren. Aquests sensors són **lidars d'escaneig** (lidar: *light detection and ranging*). Els lidars poden mesurar distàncies més grans que les càmeres de temps de vol, i funcionen més bé a la llum del dia.

Uns altres tipus freqüents de sensors de distància són els radars, usat sovint als vehicles aeris no tripulats. Els sensors radar poden mesurar distàncies de múltiples kilòmetres. A l'altre extrem de distància hi ha els sensors tàctils (bigotis, panells de cops, pell sensible al tacte). Aquests sensors mesuren la distància a partir del contacte físic, i només es poden fer servir per percebre objectes molt propers al robot.

Una segona classe important de sensors són els **sensors de localització**. La majoria de sensors de localització fan servir la detecció de distància com a mecanisme principal per determinar la posició. A l'exterior, el Sistema de Posicionament Global (*GPS, Global Positioning System*) és la solució més freqüent al problema de la localització. El GPS mesura la distància a satèl·lits que emeten senyals polsats. Hi pot haver fins a 32 satèl·lits GPS, amb un mínim de 24. Actualment, n'hi ha 31 desplegats i en servei, que transmeten senyals a múltiples freqüències. Els receptors GPS recuperen la distància a aquests satèl·lits analitzant desplaçaments de fase. Mitjançant la triangulació de múltiples satèl·lits, els receptors GPS determinen la seva posició absoluta a la Terra amb un error d'alguns metres. El GPS diferencial implica un segon receptor a una posició coneguda, que dona precisió mil·limètrica en condicions ideals. Molts d'entorns interiors són plens d'estacions base sense fils, que poden ajudar els robots a situar-se analitzant el senyal sense fils. Sota l'aigua, hi ha les balises actives de sonar, que fan servir el so per informar els vehicles subaquàtics autònoms de la seva distància a aquestes balises.

La tercera classe important són els **sensors propioceptius**, que informen el robot del seu moviment propi. Per determinar la configuració exacta d'una articulació robòtica, els motors sovint duen **codificadors rotatius** (shaft decoders), que mesuren la revolució dels motors en increments petits. En els braços robòtics, els codificadors rotatius poden donar informació precisa en qualsevol període de temps. En els robots mòbils, els decodificadors d'eix que informen de les revolucions de les rodes es poden usar en odometria (mesura de la distància recorreguda). De tota manera, les rodes tenen deriva i lliscament, de forma que l'odometria només és precisa en distàncies curtes. Les forces externes, com el corrent d'aigua en els **AUV** i el vent en els **UAV**, incrementen la incertesa en la posició. Els sensors inercials, com ara els **giroscopis**, es basen en la resistència de la massa al canvi de velocitat, i poden ajudar a reduir la incertesa.

Uns altres aspectes importants de l'estat del robot el mesuren els **sensors de força** i els **sensors de parell**. Aquests dispositius són indispensables quan els robots manipulen objectes fràgils o bé tenen una forma i posició desconegudes. Imaginem el cas d'un braç robòtic que ha d'enroscar una bombeta. El sensor de força mesurarà

com de fort l'està subjectant, i el sensor de parell mesurarà com de fort l'està fent girar. Mesurant això centenars de vegades cada segon, es pot evitar rompre la bombeta.

## 2.2. Actuadors

Els actuadors són els mitjans pels quals els robots es mouen i canvien la forma del seu cos. Per entendre el disseny dels actuadors, convé tractar del moviment i la forma en abstracte, usant el concepte de **grau de llibertat**. Es compta un grau de llibertat per cada direcció independent en què el robot, o un dels seus actuadors, es pot moure. Per exemple, un robot mòbil rígid com un AUV té sis graus de llibertat, tres per a la seva posició ( $x, y, z$ ) i tres per a la seva orientació angular (*pitch*, *yaw* i *roll*). Aquests sis graus defineixen l'**estat cinemàtic** o **postura** del robot. L'**estat dinàmic** d'un robot inclou aquests sis valors més sis dimensions addicionals per a la taxa de variació de cada dimensió cinemàtica, és a dir, les seves velocitats.

Per als cossos no rígids, hi ha graus de llibertat addicionals dins el robot mateix. Per exemple, el colze d'un braç humà té dos graus de llibertat. Pot flexionar el braç amunt o avall, a més de rotar-lo cap a la dreta o cap a l'esquerra. El canell, en canvi, té tres graus de llibertat. Les articulacions robòtiques també tenen un, dos o tres graus de llibertat cadascuna. Fan falta sis graus de llibertat per situar un objecte, com ara una mà, en una posició i amb una orientació particular.

El [manipulador de Stanford](#), per exemple, té exactament sis graus de llibertat, creats per sis articulacions de rotació i una articulació prismàtica que genera el moviment de desplaçament lineal. Podeu comprovar que el braç humà té més de sis graus de llibertat amb un experiment senzill: posau la mà damunt una taula i notau que encara teniu la llibertat de rotar el colze sense canviar la configuració de la mà. Els manipuladors que tenen graus de llibertat addicionals són més bons de controlar que no els manipuladors que tenen els graus de llibertat mínims. Molts de manipuladors industrials, per això, tenen set graus de llibertat en lloc de sis.

En els robots mòbils, els graus de llibertat no són necessàriament els mateixos que el nombre d'elements actuats. Considerem, per exemple, un cotxe típic: es pot moure envant i enrere, i pot voltar, cosa que dona dos graus de llibertat. En canvi, la configuració cinemàtica d'un cotxe és tridimensional: damunt una superfície plana, es pot dur fàcilment el vehicle a qualsevol punt ( $x, y$ ), amb qualsevol orientació. Per tant, el cotxe té tres **graus efectius de llibertat** però dos **graus de llibertat controlables**. Un robot és **no holonòmic** si té més graus de llibertat efectius que no graus de llibertat controlables; i **holonòmic** si els dos nombres són el mateix. Els vehicles holonòmics són molt més fàcils de controlar. Seria més fàcil aparcar un cotxe que es pogués moure lateralment a més de envant-enrere. Però aquests vehicles, més fàcils de controlar, són mecànicament més complexos. La majoria de braços robòtics són holonòmics; la majoria de robots mòbils són no-holonòmics.

Els robots mòbils disposen d'una varietat de mecanismes de locomoció, incloent-hi rodes, pistes i potes. Els robots d'**accionament diferencial** tenen dues rodes o cintes accionades independentment, una a cada banda, com per exemple un tanc militar. Si les dues rodes es mouen a la mateixa velocitat, el vehicle es desplaça en línia recta. Si es mouen en direccions oposades, el vehicle gira sobre un mateix punt. Una alternativa és l'**accionament sincronitzat**, en què cada roda es pot moure i girar al voltant del seu eix. Per evitar un moviment desordenat, les rodes van coordinades estretament. Per moure's en línia recta, per exemple, les rodes apunten en la mateixa direcció i es mouen a la mateixa velocitat. Tant l'accionament diferencial com el sincronitzat són no holonòmics. Alguns robots més cars usen accionament holonòmic, que té tres o més rodes que es poden orientar i moure independentment.

Alguns robots mòbils tenen braços. En aquest cas, es poden fer servir molles per compensar la gravetat, i ofereixen una resistència petita a les forces externes. Un disseny així redueix el perill físic per a les persones que puguin topar amb el robot. Això és clau en el desplegament de robots en entorns domèstics.

Les potes, a diferència de les rodes, poden adaptar-se a terreny irregular, però són molt lentes en superfícies planes, ja que són difícils de construir mecànicament. S'ha aconseguit que els robots amb cames caminin, corrin i fins i tot botin. Els robots **estàticament estables** són capaços de mantenir l'equilibri fins i tot aturats, mentre que els robots **dinàmicament estables** necessiten moure's per mantenir l'equilibri.

Hi ha d'altres mètodes de moviment: els vehicles aeris usen hèlixs o turbines; els vehicles submarins usen hèlixs o propulsors. Un robot complet també necessita una font d'energia per alimentar els seus actuadors. El **motor elèctric** és el mecanisme més popular tant per als actuadors com per a la locomoció dels manipuladors, però els **actuadors pneumàtics** amb gas comprimit i l'**activació hidràulica** amb fluids pressuritzats també tenen els seus camps d'aplicació.



### 3. Percepció robòtica

La percepció és el procés pel qual els robots traslladen les mesures dels sensors a representacions internes de l'entorn. La percepció és difícil per diverses raons: els sensors introdueixen soroll, l'entorn és observable parcialment, impredecible i sovint dinàmic. En altres paraules, els robots tenen problemes d'**estimació d'estat**, o **filtratge**. Les bones representacions internes per als robots tenen tres característiques: contenen prou informació perquè el robot pugui prendre bones decisions, estan estructurades de forma que es puguin actualitzar eficientment i són naturals, en el sentit que les variables internes corresponen a variables d'estat naturals en el món físic.

Hi ha diverses tècniques (filtres de Kalman, Models Ocults de Markov, xarxes dinàmiques de Bayes) que poden representar els models de transició i de sensor d'un entorn observable parcialment, i hi ha algorismes exactes i aproximats per estimar l'estat de creença, la distribució de probabilitat a posteriori sobre les variables d'estat de l'entorn. Ens els problemes de robòtica, incloem les pròpies accions passades del robot com a variables observades del model. Farem servir la notació següent:  $X_t$  és l'estat de l'entorn en l'instant  $t$ ,  $Z_t$  és l'observació presa en l'instant  $t$ , i  $A_t$  és l'acció presa després d'haver rebut l'observació.

Ara es tracta de calcular el nou estat de creença  $P(X_{t+1} | z_{1:t+1}, a_{1:t})$ , a partir de l'estat de creença actual i la nova observació  $z_{t+1}$ . Cal condicionar explícitament respecte de les accions i les observacions, i es tracten variables contínues en comptes de discretes. Per això s'ha d'usar una integral en lloc d'un sumatori discret.

En aquest càlcul la informació sobre les variables d'estat  $X$  a l'instant següent  $t + 1$  es calcula recursivament a partir de l'estimació corresponent l'instant anterior  $t$ . Aquest càlcul inclou l'acció prèvia  $a_t$  i la mesura del sensor actual,  $z_{t+1}$ . Per exemple, si l'objectiu és desenvolupar un robot que juga a futbol,  $X_{t+1}$  pot ser la posició de la pilota de futbol relativa a la del robot. La part  $P(X_t | z_{1:t}, a_{1:t})$  representa el que se sap a partir de les mesures dels sensors i els controls passats. L'equació anterior indica com estimar aquesta posició recursivament, tenint en compte progressivament les mesures dels sensors (per exemple, imatges de càmeres) i les ordres de moviment del robot.

La probabilitat  $P(X_{t+1} | x_t, a_t)$  s'anomena **model de transició** o **model de moviment**, mentre que  $P(z_{t+1} | X_{t+1})$  és el **model del sensor**.

## 4. Planificació del moviment

Tots els càlculs que facin els robots al final han de servir per decidir com moure els actuadors. El problema del **moviment punt a punt** és situar el robot o bé el seu actuator final en una posició objectiva determinada. Un repte més gran és el **moviment conforme**, en què un robot es mou mantenint el contacte físic amb un obstacle. Un exemple de moviment conforme és el robot manipulador que enrosca una bombeta, o un robot que empeny una capsa per la superfície d'una taula.

Comencem per trobar una representació adequada en què els problemes de planificació del moviment es puguin descriure i resoldre. Resulta que l'anomenat **espai de configuració** (l'espai dels estats del robot definits per posició, orientació i angle de les articulacions) és més còmode per treballar-hi que no l'espai tridimensional original. El problema de la **planificació del camí** (*path planning*) és trobar un camí d'una configuració a una altra en l'espai de configuracions. La complicació que afegeix la robòtica és que aquesta planificació del camí implica espais *continus*. Hi ha dos enfocaments per resoldre això: la **descomposició en cel·les** i l'**esqueletització** (*skeletonization*). Totes dues redueixen el problema continu a un problema discret de cerca en un graf. En aquest apartat, suposam que el moviment és determinístic i la localització del robot és exacta. Més endavant relaxarem aquestes suposicions.

### L'espai de configuracions

Comencem amb una representació per a un problema de moviment d'un robot simple. Prenguem un robot amb dues articulacions (una espatlla i un colze) que es mouen independentment. Quan es mouen les articulacions, canvien les posicions del colze i la pinça. L'espalla no es mou perquè està connectada al terra amb un braç rígid. Per tant, amb quatre quantitats podem representar la posició de tot el sistema: unes coordenades  $((x_c, y_c))$  per al colze i unes coordenades  $((x_p, y_p))$  per a la pinça. Aquestes quatre coordenades caracteritzen completament l'estat del robot. Formen el que es coneix com a **representació de l'espai de treball** (*workspace representation*), pel fet que les coordenades del robot s'expressen en el mateix sistema que els objectes que vol agafar, moure o esquivar. Les representacions en l'espai de treball són útils per a la detecció de col·lisions, sobretot si el robot i tots els objectes es representen amb models poligonals simples.

El problema de la representació en l'espai de treball és que no totes les coordenades es poden atènyer, fins i tot en absència d'obstacles. Això és degut a les **restriccions de lligam** (*linkage constraints*) en l'espai de coordenades abastables. Per exemple, la posició del colze i la posició de la pinça sempre són a una distància constant, perquè estan unides per un avantbraç rígid. Un planificador del moviment del robot definit sobre les coordenades de l'espai de treball ha de fer front al repte de generar trajectòries que compleixin aquestes restriccions. Això és especialment difícil perquè l'espai d'estats és continu i les restriccions són no lineals. Resulta que és més fàcil planificar amb una representació de l'**espai de configuracions** (*configuration space*). En comptes de representar l'estat del robot amb les coordenades cartesianes dels seus elements, representarem l'estat amb la configuració de les articulacions. En aquest exemple amb dues articulacions, tendrem dos angles  $\phi_c$  i  $\phi_p$  per a les articulacions de l'espalla i la pinça respectivament. En absència d'obstacles, un robot pot prendre lliurement qualsevol valor en l'espai de configuracions. En particular, per planificar un camí es podria unir directament els dos punts, origen i destí, mitjançant una recta. Seguint aquest camí, el robot podria simplement moure les seves articulacions a una velocitat constant, fins arribar a la posició desitjada.

Malauradament, els espais de configuració tenen els seus problemes. La tasca d'un robot se sol especificar en l'espai de treball, no en l'espai de configuració. Això planteja la qüestió de com mapejar d'un espai a l'altre. La transformació de les coordenades de l'espai de configuració en coordenades de l'espai de treball és simple: implica una seqüència de transformacions directes de coordenades. Aquestes transformacions són lineals en les articulacions prismàtiques i trigonomètriques a les articulacions de rotació. Aquesta cadena de transformacions de coordenades rep el nom de **cinemàtica**.

El problema invers, calcular la configuració d'un robot en que la posició del seu actuator és en coordenades de l'espai de treball es denomina **cinemàtica inversa**. El càlcul de la cinemàtica inversa és difícil, sobretot per a robots amb molts graus de llibertat. En particular, la solució poques vegades és única. En general, aquest braç robòtic amb dues articulacions té entre zero i dues solucions cinemàtiques inverses per a cada conjunt de coordenades de l'espai de treball. La majoria de robots industrials tenen prou graus de llibertat com per trobar infinites solucions als problemes de moviment.

El segon problema amb les representacions de l'espai de configuracions ve dels obstacles que hi pot haver a l'espai de treball del robot. En l'espai de treball, aquests obstacles poden tenir formes geomètriques simples. Però i en l'espai de configuracions?

L'espai de configuracions es pot descomposar en dos subespais: l'espai de totes les configuracions que el robot pot atènyer, l'**espai lliure**, i l'espai de les configuracions inassolibles, l'**espai ocupat**.

Fins i tot si l'espai de treball del robot es representa amb polígons plans, la forma de l'espai lliure pot ser molt complicada. A la pràctica, per tant, habitualment es testeja l'espai de configuracions en comptes de construir-lo explícitament. Un planificador pot generar una configuració i llavors provar-la per mirar si és a l'espai lliure aplicant la cinemàtica del robot, i a continuació detectar col·lisions a l'espai de treball.

## 5. Planificació del moviment amb incertesa

A l'apartat anterior, no hem tengut en compte una característica essencial dels problemes robòtics: la **incertesa**. En robòtica, la incertesa sorgeix de dues fonts principals: l'observabilitat parcial de l'entorn i l'estocasticitat (o manca de modelatge) de les accions del robot. També pot ser una font d'error la utilització d'algorismes d'aproximació com el filtratge de partícules, que no dona al robot un estat de creença exacte fins i tot si l'entorn està modelitzat perfectament.

La majoria de robots actuals usen algorismes determinístics per a la presa de decisions, com la planificació de camí de l'apartat anterior. Per aconseguir-ho, és habitual extreure l'**estat més versemblant** (*most likely state*) a partir de la distribució de probabilitat que produeix l'algorisme d'estimació d'estat. L'avantatge de fer-ho així és purament computacional. Planificar camins en l'espai de configuració ja és prou complex; encara seria pitjor haver de tenir en compte una distribució de probabilitat completa sobre els estats. Ignorar la incertesa d'aquesta manera funciona prou bé quan la incertesa és petita. De fet, quan el model de l'entorn canvia al llarg del temps pel fet d'incorporar mesures dels sensors, molts de robots planifiquen els camins en línia durant la mateixa execució del pla. Això és la tècnica de **replanificació en línia** (*online replanning*).

Malauradament, ignorar la incertesa no sempre funciona. En alguns problemes la incertesa del robot és simplement massa grossa: com pot un planificador de camí determinista controlar un robot mòbil que no té cap idea d'on és? En general, si el veritable estat del robot no és el que identifica la regla de màxima versemblança, el control que en deriva serà subòptim. Segons la magnitud de l'error, hi pot arribar a haver col·lisions amb obstacles.

El camp de la robòtica ha adoptat una sèrie de tècniques per acomodar la incertesa. Si el robot només té incertesa en la transició d'estats, però l'estat és completament observable, el problema es pot modelitzar com un **procés de decisió de Markov** (*Markov Decision Process, MDP*). La solució d'un MDP és una **política** òptima, que determina el que el robot ha de fer en cada estat. D'aquesta forma, pot manejar tota mena d'errors de moviment, mentre que una solució d'un camí únic seria molt menys robusta. En robòtica, les polítiques s'anomenen **funcions de navegació**. La funció de valor es transforma en una funció de navegació simplement seguint el gradient.

Quan hi ha observabilitat parcial, el problema torna molt més difícil. El problema de control del robot que en deriva és un MDP parcialment observable, **POMDP**. En aquestes situacions, el robot manté un estat de creença intern. La solució d'un POMDP és una política definida sobre l'estat de creença del robot. Dit d'una altra forma, l'entrada a la política és una distribució de probabilitat completa. Això permet que el robot prengui la decisió en base al que sap, i també al que no sap. Per exemple, si no està segur d'una variable d'estat crítica, pot invocar una acció de recollida d'informació. Això no té sentit en els MDP completament observables.

Les tècniques de POMDP exactes no es poden aplicar directament a la robòtica, no hi ha mètodes per resoldre-les en espais de moltes dimensions. Una solució és posar com a objectiu de control la minimització de la incertesa. Per exemple, l'heurística de la **navegació costanera** requereix que el robot estigui a prop de punts de referència coneguts.

## 6. Moviment

Fins ara, hem parlat sobre com planificar el moviment, però no com moure's. Els plans, en particular els que produeixen els planificadors de camí determinístics, pressuposen que el robot simplement pot seguir fidelment qualsevol camí que el planificador generi. En el món real, però, les coses no són així. Els robots tenen inèrcia i no poden executar camins arbitraris excepte a velocitats molt lentes. En la majoria de casos, els robots exerceixen forces, més que no especifiquen posicions. Per calcular aquestes forces hi ha diversos mètodes.

## 7. Architectures de programari

Una **arquitectura de programari** (*software architecture*) és una metodologia per estructurar algorismes. Una arquitectura inclou llenguatges i eines per escriure programes, així com una filosofia general sobre com ajuntar els programes.

Actualment, les architectures de programari per a la robòtica han de decidir com combinar el control reactiu i la planificació deliberativa basada en un model. En molts d'aspectes, les tècniques reactives i deliberatives tenen fortaleeses i febleses ortogonals, on una tècnica és forta l'altra és feble i a la inversa. El control reactiu és dirigit pels sensors i apropiat per prendre decisions de baix nivell en temps real. Això no obstant, rarament dona una solució plausible al nivell global, perquè les decisions de control generals depenen d'informació que no pot ser mesurada en el moment de la presa de decisions. En aquests problemes, la planificació deliberada és una opció més adequada.

Per tant, la majoria d'arquitectures robòtiques fan servir tècniques reactives als nivells més baixos de control i tècniques deliberatives als nivells més alts. Les architectures que combinen les tècniques reactives i deliberatives es denominen **arquitectures híbrides**.

## 8. Humans i robots

Fins ara hem vist la planificació en robots i l'aprenentatge per actuar aïlladament. Això és útil per a alguns robots, com els rovers que s'envien a explorar planetes llunyans. Però majoritàriament els robots no es construeixen per treballar aïlladament. Els construïm perquè ens ajudin, i per treballar en entorns humans, al nostre voltant i amb nosaltres.

Això genera dos reptes. El primer és l'optimització de la recompensa quan hi ha persones actuant en el mateix entorn que el robot. Això és el problema de la **coordinació**. Quan la recompensa del robot depèn no només de les seves pròpies accions, sinó també de les accions que prenen les persones, el robot ha de triar les seves accions d'una forma que combini bé amb les accions de les persones. Quan humans i robots fan part del mateix equip, aquesta coordinació esdevé **col·laboració**.

El segon repte és l'optimització del que realment volen les persones. Si un robot ha d'ajudar persones, la seva funció de recompensa ha d'incentivar accions que les persones volen que el robot realitzi. Esbrinar la funció de recompensa, o política, per al robot és un problema d'interacció. Explorem aquests dos reptes l'un darrere l'altre.

## 8.1. Coordinació

Suposem, com fins ara, que el robot té una funció de recompensa definida clarament. Ara bé, en comptes d'optimitzar-la de forma isolada, el robot l'ha d'optimitzar al voltant d'un humà que també actua. Per exemple, quan un vehicle autònom s'incorpora a l'autopista, ha de negociar la maniobra amb un conductor humà que condueix pel carril principal. Ha d'accelerar per entrar primer, o bé frenar per cedir el pas? Després, quan s'acosta un signe de stop, abans de voltar a la dreta, ha de mirar si hi ha cap ciclista al carril bici, o cap vianant que vulgui travessar.

O pensem en un robot mòbil en un espai de trobada. Quan un humà que avança cap al robot s'orienta una mica cap a la dreta, indicant cap a quin costat vol passar, el robot hi ha de respondre, clarificant la seva intenció per evitar una col·lisió.

### Els humans com a agents aproximadament racionals

Podem formular la coordinació modelitzant-ho com un joc entre el robot i l'humà. Això implica fer la suposició que l'humà és un agent incentivat per uns objectius. Això no vol dir que l'humà sigui un agent perfectament racional (que trobi solucions òptimes al joc), però el robot sí que pot estructurar la forma en què raona sobre l'humà a través dels objectius que l'humà pot tenir. En aquest joc hi ha quatre elements:

- L'estat de l'entorn, que captura les configuracions de l'agent robòtic i l'agent humà, diguem-ne  $x = (x_R, x_H)$
- Cada agent pot prendre accions,  $u_R$  i  $u_H$
- Cada agent té un objectiu que es pot representar com un cost,  $J_R$  i  $J_H$ . Cada agent vol arribar al seu objectiu de forma segura i eficient.
- Com en tots els jocs, cada objectiu depèn de l'estat i de les accions dels dos agents:  $J_R(x, u_R, u_H)$  i  $J_H(x, u_R, u_H)$ .

Hi ha tres aspectes que compliquen aquest joc: la incompletesa, la continuïtat i la complexitat.

1. L'humà i el robot no coneixen l'objectiu de l'altre, i això fa que es tracti d'un **joc d'informació incompleta**.
2. Els espais d'estat i d'acció són **continus**. Els espais discrets es poden cercar amb arbres, però els continus no.
3. El comportament humà no sempre queda ben caracteritzat com una solució al joc. Cal pensar què farà el robot com a resposta al que fa la persona, que depèn del que el robot pensa que farà la persona, i ben aviat som en un punt en què ens demanem "què penses que pens que penses que pens..." Els humans no podem gestionar això i aleshores es presenten conductes subòptimes, que el robot haurà de tenir en compte.

Amb tot això, què és el que ha de fer per exemple un cotxe autònom quan el problema de la coordinació és així de complicat? Caldrà descompondre el joc en prediccions sobre la conducta humana i decidir què ha de fer el robot donades aquestes prediccions.

### Predicció de l'acció humana

Predir les accions humanes és difícil perquè depenen de les accions dels robots i viceversa. Una drecera que els robots fan servir és suposar que la persona està ignorant el robot. Això simplifica l'objectiu de l'humà no fent-lo dependre de les accions del robot:  $J_H(x, u_H)$ .

Aquesta separació entre la predicció i l'acció simplifica que el robot pugui manejar la interacció, però sacrifica el bon rendiment. Un robot amb aquesta separació deixa d'entendre que les seves accions acaben influint sobre què fan les persones.

Els investigadors en robòtica treballen en la millora d'aquestes interaccions coordinades de forma que els robots treballin més bé amb les persones.

### Predicció humana sobre el robot

La informació incompleta sol tenir dues cares: el robot desconeix l'objectiu humà i l'humà desconeix l'objectiu del robot. Però el robot pot actuar de forma que faciliti que l'humà faci prediccions correctes, actuant de forma que el seu objectiu sigui fàcil d'inferir.

Un cas especial d'interès es dona quan els objectius de l'humà i del robot coincideixen:  $J_H = J_R$ . Per exemple, si tots dos, humà i robot, s'ha de fer el dinar o la neteja, som davant una situació de **col·laboració**. En aquest cas es



pot definir un agent conjunt que té com a accions les tuples de les accions de l'humà i del robot, i que optimitza l'objectiu compartit  $J_H(x, u_H, u_R) = J_R(x, u_R, u_H)$ . En aquest cas, es calcula el pla o la política de l'agent conjunt i així es determina què ha de fer cadascú.

Això funcionaria molt bé si els humans funcionàssim de forma perfectament òptima. Però a la practica s'ha de replanificar després d'executar la primera acció del pla. D'aquesta forma el robot va adaptant el seu pla al que l'humà realment està fent.

### Els humans com a agents de caixa negra

No fa falta modelitzar les persones com a agents intencionals guiats per objectius per poder-s'hi coordinar. Un model alternatiu considera l'humà un agent que segueix una política que interfereix amb la dinàmica de l'entorn. El robot no coneix aquesta política, però pot tractar el problema com la necessitat d'actuar en un procés amb dinàmica desconeguda.

El robot pot ajustar una política a les dades del comportament de l'humà, i usar-ho per calcular-hi una política per a ell mateix.

També hi ha l'alternativa de l'aprenentatge de reforç sense model: el robot comença amb una política o funció de valor, i la va millorant progressivament mitjançant tria i error. Veurem l'aprenentatge de reforç a un lliurament posterior del mòdul d'aprenentatge automàtic.

## 8.2. Aprendre el que volen els humans

Una altra forma en què la interacció amb humans entra en la robòtica és en la funció de cost mateixa. El marc de treball dels agents racionals i els algorismes associats redueix el problema de generar una bona conducta a especificar una bona funció de recompensa. Però per als robots, així com per a molts d'altres agents intel·ligents, definir bé la funció de cost és difícil.

Pensem en els vehicles autònoms: volem que arribin a la destinació, que siguin segurs, que circulin còmodament per als humans, que compleixin les normes de trànsit, etc. El disseny d'un sistema així ha d'equilibrar aquests diversos components en la funció de cost. La tasca de disseny és difícil perquè els robots es construeixen per ajudar els usuaris finals, i no tots els usuaris són iguals. Tots tenim preferències diferents sobre com d'agressiva volem que sigui la conducció, etc.

A continuació exploram dues alternatives per mirar de fer correspondre la conducta del robot amb el que realment volem que el robot faci. La primera és aprendre la funció de cost a partir de l'entrada humana. La segona és obviar la funció de cost i imitar demostracions humanes de la tasca.

### Aprentatge de la preferència: aprendre les funcions de cost

Imaginem que un usuari està ensenyant a un robot com realitzar una tasca. Per exemple, està conduint un vehicle de la forma que vol que ho faci el robot. Com pot el robot usar aquestes accions, demostracions, per optimitzar la seva funció de cost?

Si la persona condueix de forma defensiva, la funció de cost que explica les seves accions posa molt de pes en la seguretat i més poc en l'eficiència. El robot pot adoptar aquesta funció de cost com a pròpia i optimitzar-la quan condueix el vehicle ell mateix.

### Aprentatge de polítiques via imitació

Una alternativa per esquivar les funcions de cost és aprendre la política del robot desitjada directament. Les demostracions de l'humà constitueixen un conjunt de dades d'estats etiquetats amb l'acció que el robot ha de realitzar:  $D = (x_i, u_i)$ . Amb aquestes dades, el robot pot ajustar una política que obtengui l'acció a partir de l'estat  $\pi : x \rightarrow u$  i executar aquesta política. Això s'anomena **aprentatge per imitació** o **clonació conductual**.

## 9. Robòtica humanoide

L'article que oferim en aquest apartat descriu la **la tecnologia robòtica humanoide**. En primer lloc, s'hi presenta el desenvolupament històric i el progrés en termes de maquinari dels robots humanoides bípedes de cos complet, juntament amb els avenços en generació de patrons per a la locomoció bípeda. Després es presenta el «moviment de cos sencer» –la coordinació de moviments de cames i braços per a aprofitar l'alt grau de llibertat dels humanoides–, seguit de la seva aplicació en disciplines com l'avaluació de dispositius i el muntatge a gran escala. També es tracta el tema dels humanoides de mig cos amb una base mòbil, utilitzats principalment en la investigació de les interaccions humà-robot i en la robòtica cognitiva, abans de centrar-se en els problemes actuals i en les perspectives de futur d'aquest camp

El terme **robot humanoide** (o simplement **humanoide**) sol referir-se a aquells robots amb forma semblant a la dels humans. No obstant això, la definició varia segons a qui preguntem: hi ha qui diu que un humanoide hauria de tenir un «cos complet» que inclogui dos braços i dues cames, exactament com un humà, però altres se centren més en la comunicació o en la seva capacitat per a dur a terme tasques i estenen la definició a un robot mòbil amb rodes que té "la meitat superior del cos", amb un cap, tors i dos braços. L'article següent pretén cobrir la investigació en robòtica humanoide en un sentit ampli per mostrar les tendències globals d'investigació en aquesta disciplina.

Eiichi Yoshida, [Robots que semblen humans](#)

## 10. Aplicacions

Vegem alguns dels camps principals d'aplicació de la tecnologia robòtica.

### Indústria i agricultura

Tradicionalment, els robots s'han desplegat en àrees que requereixen un treball difícil per als humans, tot i que prou estructurat per permetre una automatització robotitzada. El millor exemple és la línia de muntatge, en què els robots manipuladors realitzen tasques com acoblar, situar components, manejar materials, soldar o pintar. En moltes d'aquestes tasques, els robots són més efectius en costos que no els treballadors humans. A l'exterior, moltes de les màquines pesants que es fan servir per a les collites, a les mines o per excavar el terreny han esdevingut robots. Tot i que molts d'aquests sistemes encara són en fases de prototip, és qüestió de temps que els robots realitzin molta feina semimecànica feta ara per persones.

### Transport

El transport robòtic té moltes cares: des d'helicòpters autònoms que fan arribar càrregues a llocs d'accés difícil, fins a cadires de rodes automàtiques que porten persones que no poden controlar elles mateixes la cadira, passant per [carretons pòrtic](#) autònoms que superen els conductors humans en el transport de contenidors dels vaixells als camions en els molls de càrrega.

### Cotxes robòtics

Hi ha molts d'accidents provocats per la manca d'atenció dels conductors, distrets en tasques com enviar missatges de text amb el mòbil. Amb la conducció automàtica, es pot reduir la taxa de sinistralitat a les carreteres, així com alliberar temps de les persones per dedicar-lo a activitats més productives que conduir.

### Salut

Els robots es fan servir com més va més per ajudar els cirurgians amb la situació dels instruments a l'hora d'intervenir en òrgans tan delicats com el cervell, els ulls o el cor. Els robots han esdevingut eines indispensables en un ventall de procediments quirúrgics, com ara les substitucions de maluc, gràcies a la seva gran precisió. En estudis pilot, s'ha trobat que els dispositius robòtics redueixen el risc de lesions en les colonoscòpies. Fora de la sala d'operacions, s'han començat a desenvolupar ajudes robòtiques per a la gent gran i les persones discapacitades, com ara caminadors robòtics intel·ligents o joguines intel·ligents que recorden les preses de medicació i fan companyia. També es treballa en dispositius de rehabilitació que ajuden els pacients a realitzar determinats exercicis.

### Entorns perillosos

Els robots han ajudat les persones en la neteja de residus nuclears, per exemple a Txernòbil o Three Mile Island. També n'hi hagué després del col·lapse del World Trade Center, en què entraren dins estructures considerades massa perilloses per als equips de rescat.

Alguns països han usat robots per transportar munició i desactivar bombes, una tasca notòriament perillosa. Hi ha desenvolupaments per a la neteja de camps de mines, a la terra i a la mar. Molts d'aquests robots són teleoperats per un humà amb control remot. Donar autonomia a aquests robots és una passa futura important.

### Exploració

Els robots han arribat on no ha arribat mai ningú abans, fins i tot a la superfície de Mart. Els braços robòtics ajuden els astronautes a desplegar i retirar satèl·lits, i a construir l'Estació Espacial Internacional. Els robots també ajuden a l'exploració submarina. S'usen rutinàriament en la localització de vaixells enfonsats. Els robots també poden fer un mapa d'una mina abandonada, o entrar dins el cràter d'un volcà actiu per adquirir dades per a la recerca climàtica. Els vehicles aeris no tripulats anomenats drons es fan servir en operacions militars. Els robots són eines molt efectives per recollir informació en espais d'accés difícil o perillós.

### Serveis personals

Els robots de servei ajuden les persones a realitzar tasques quotidianes. Els robots domèstics disponibles comercialment inclouen aspiradores, tallagespes o caddies de golf.

## Entreteniment

Els robots han començat a entrar a la indústria de l'entreteniment i la joguina. Al **futbol robòtic**, per exemple, hi juguen robots mòbils autònoms. Aquesta aplicació és interessant per a la recerca en intel·ligència artificial, ja que hi apareixen problemes rellevants a d'altres aplicacions més serioses.

## Augmentació humana

Un darrer camp d'aplicació de la robòtica és el de l'augmentació humana. S'han desenvolupat màquines amb cames que caminen i poden transportar persones, de forma semblant a com ho fa una cadira de rodes. També es treballa en dispositius que ajudin les persones a caminar o moure els braços, amb forces addicionals exercides per estructures exoesquelètiques. Si aquests dispositius s'installen de forma permanent, ja es poden considerar membres robòtics artificials. La teleoperació robòtica, o telepresència, és una altra forma d'augmentació humana. La teleoperació implica desenvolupar tasques a distància amb l'ajuda de dispositius robòtics.

Hi ha projectes que apunten tan lluny com a replicar humans, almanco a un nivell molt superficial. Diverses empreses japoneses comercialitzen robots humanoides.

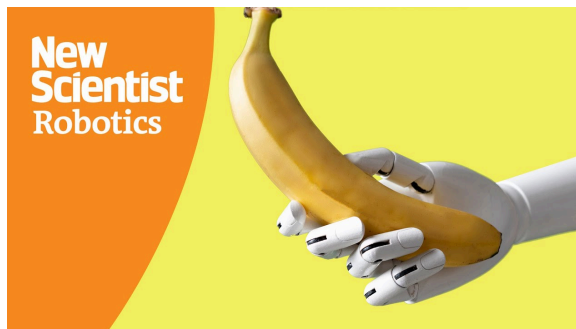
## 11. Exemples que cal saber

Al seu llibre "100 coses que cal saber d'intel·ligència artificial", Ramon López de Mántaras inclou una selecció d'exemples de robòtica. Són els següents títols, dels quals en donam enllaços de referència.

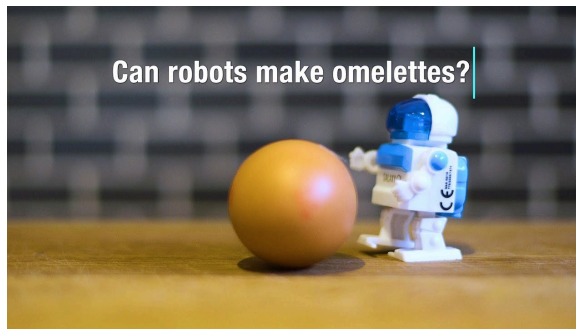
- **Vehicles autònoms** Tres empreses destacades són [Tesla](#), [Waabi](#) i [Waymo](#).
- **Bastons pigalls robotitzats** <https://visionfragiliberia.com/baston-inteligente-ciegos-rango-go-sense/>
- **Abelles de silici** <https://www.iotworldtoday.com/iiot/silicon-labs-smart-beehives-installed-at-austin-hq>
- **Imitant el vol dels insectes** <https://phys.org/news/2024-03-artificial-intelligence-virtual-fly-life.html>
- **Robots aquàtics impulsats per fotosíntesi** <https://www.electronicproducts.com/bio-robot-sustains-itself-through-photosynthesis/>
- **Ensopegant s'aprèn a caminar** <https://ashish-kmr.github.io/rma-legged-robots/>
- **Mans amb sis dits**



- **Pelar plàtans**



- **És massa salada la truita?**



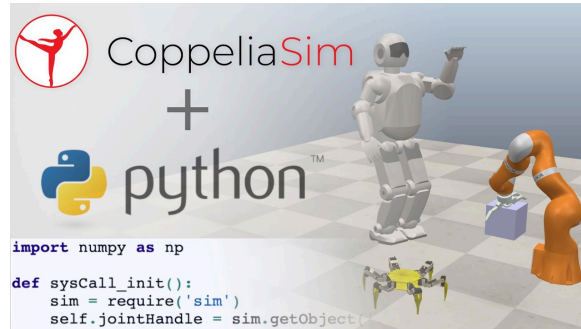
- **Màquines sexuals** <https://www.npr.org/2020/04/13/8333331551/sex-machines-love-in-the-age-of-robots>
- **Evolució robòtica** <https://www.wired.com/story/the-shape-shifting-robot-that-evolves-by-falling-down/>

## 12. CoppeliaSim

**CoppeliaSim** és un simulador de robòtica àmpliament utilitzat a la indústria i l'acadèmia.

Es pot integrar amb Python per tres vies:

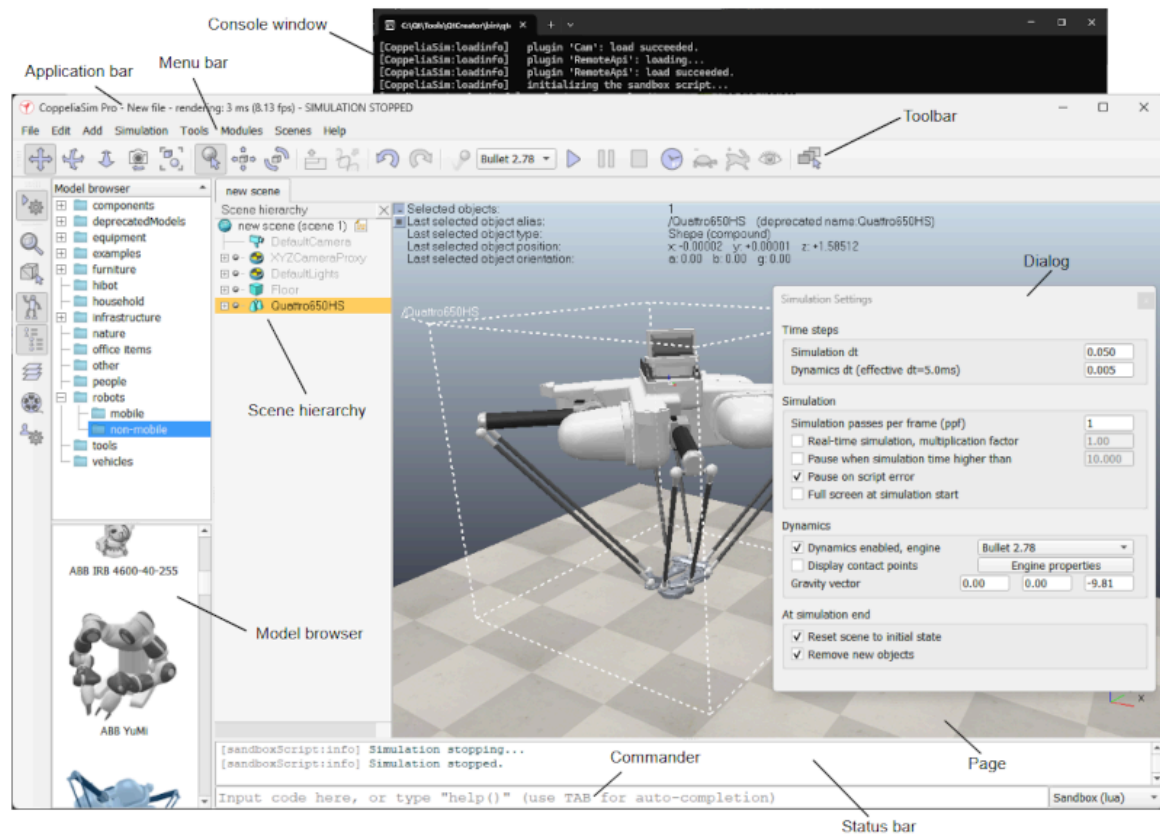
1. Integració en scripts de Python. Es pot connectar a CoppeliaSim des de qualsevol script Python, tant si corre localment com si està allotjat remotament.
2. Accés directe a la llibreria. Podem incorporar la llibreria CoppeliaSim als nostres scripts Python i aprofitar el seu conjunt de funcions.
3. Llançament de scripts Python. CoppeliaSim pot programar l'inici de l'execució de múltiples scripts de Python, optimitzant el flux del treball de simulació.



El farem servir a la tasca. Als apartats següents presentam els seus elements.

## 12.1. Interfície d'usuari

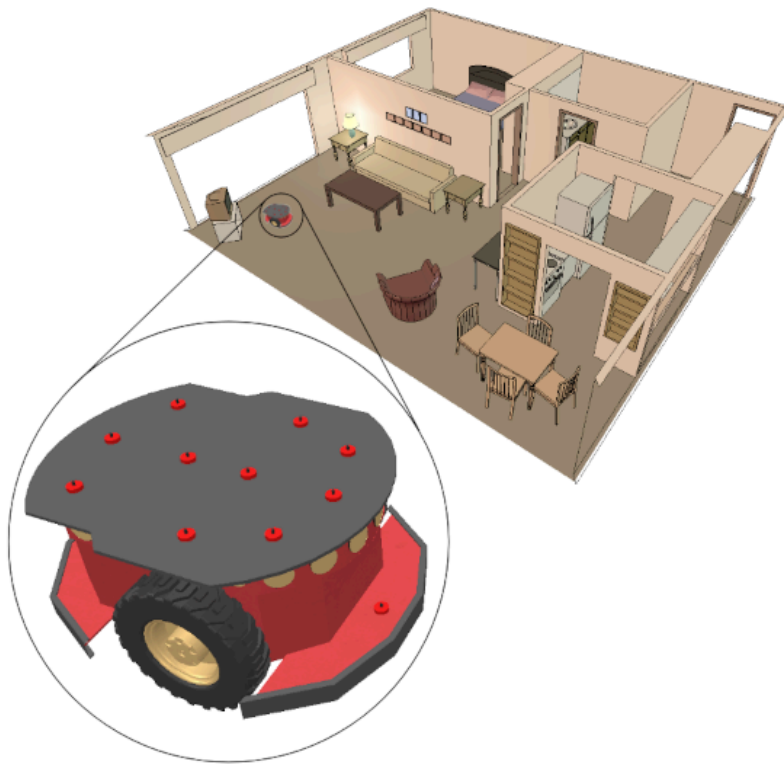
La interfície d'usuari conté una finestra de consola, una finestra d'aplicació i diversos diàlegs.





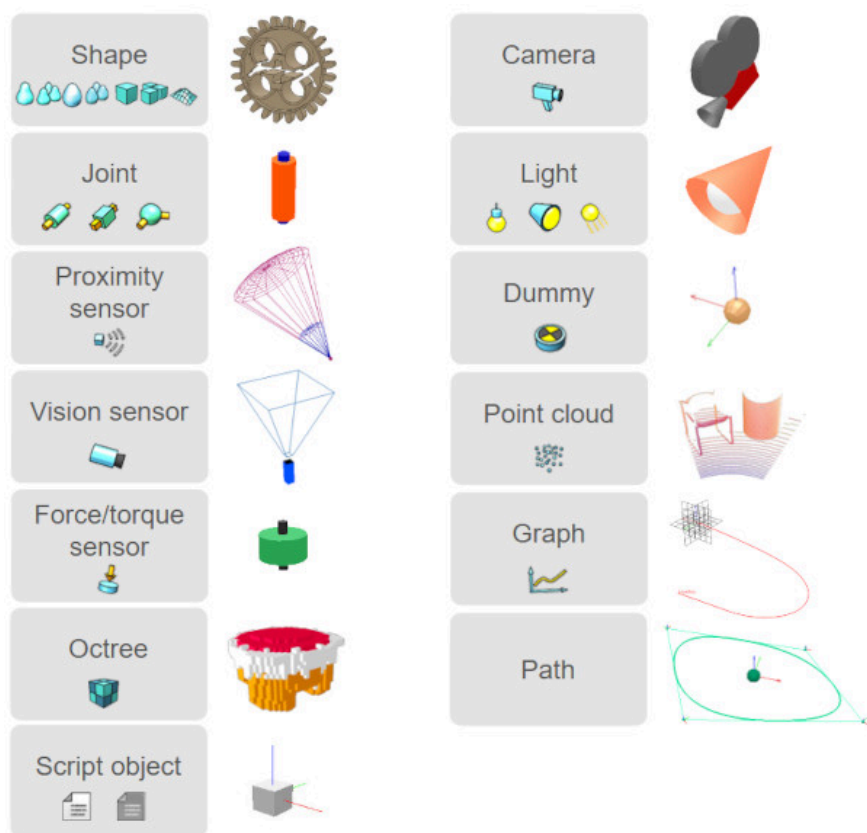
## 12.2. Escenes i models

Les escenes i els models són els principals elements de simulació de CoppeliaSim. Un model és un subelement d'una escena, clarament marcat com a model. Una escena pot contenir qualsevol nombre de models.



## 12.3. Objectes

Els elements principals de Coppeliasim que s'utilitzen per construir una escena de simulació són objectes d'escena. Són visibles a la jerarquia de l'escena i a la vista de l'escena. A la vista d'escena, els objectes d'escena tenen una representació tridimensional.



## 12.4. Funcionalitat

CoppeliaSim ofereix potents funcions, habilitades mitjançant complements com plugins, add-ons, paquets Python o mòduls Lua. A continuació hi ha una visió general de les funcions principals de CoppeliaSim.

- [Geometry / Mesh](#)
- [Kinematics](#)
- [Dynamics](#)
- [Data visualization/output](#)
- [Data manipulation/transformation](#)
- [Messaging/interfaces/connectivity](#)
- [Paths/trajectories](#)
- [Path planning](#)
- [Synthetic vision](#)
- [Custom user interfaces](#)
- [Import/Export](#)
- [Commands/settings](#)
- [Miscellaneous](#)

## 12.5. Codi

CoppeliaSim és un simulador altament personalitzable: tots els aspectes d'una simulació es poden personalitzar. A més, el propi simulador es pot personalitzar i adaptar per tal que es comporti exactament com es desitgi. Això es permet mitjançant una interfície de programació d'aplicacions (API). S'admeten més de 7 enfocaments de programació o codificació diferents, cadascun amb avantatges i desavantatges particulars sobre els altres, però els set són mútuament compatibles.

	Embedded script	Add-on / sandbox script	Plugin	Client application	Remote API client	ROS / ROS2 node	ZeroMQ node
Control entity is external (i.e. can be located on a robot, different machine, etc.)	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes
Supported programming language	Lua, Python	Lua, Python	C/C++	C/C++, Python	C/C++, Python, Java, JavaScript, Matlab, Octave	Any <sup>1</sup>	Any
Code execution speed	Relatively fast <sup>2</sup>	Relatively fast <sup>2</sup>	Fast	Fast	Depends on programming language	Depends on programming language	Depends on programming language
Communication lag	None <sup>3</sup>	None <sup>3</sup>	None	None	Yes	Yes	Yes
Communication channel	Python: ZeroMQ <sup>3</sup>	Python: ZeroMQ <sup>3</sup>	None	None	ZeroMQ or WebSockets	ROS / ROS2	ZeroMQ
Control entity can be fully contained in a scene or model, and is highly portable	Yes	No	No	No	No	No	No
Stepped operation <sup>4</sup>	Yes, inherent	Yes, inherent	Yes, inherent	Yes, inherent	Yes	Yes	Yes
Non-stepped operation <sup>4</sup>	Yes, via threads	Yes, via threads	No (threads available, but API access forbidden)	No (threads available, but API access forbidden)	Yes	Yes	Yes

<sup>1</sup>) Depends on ROS / ROS2 bindings

<sup>2</sup>) Depends on the programming language, but the execution of API functions is very fast

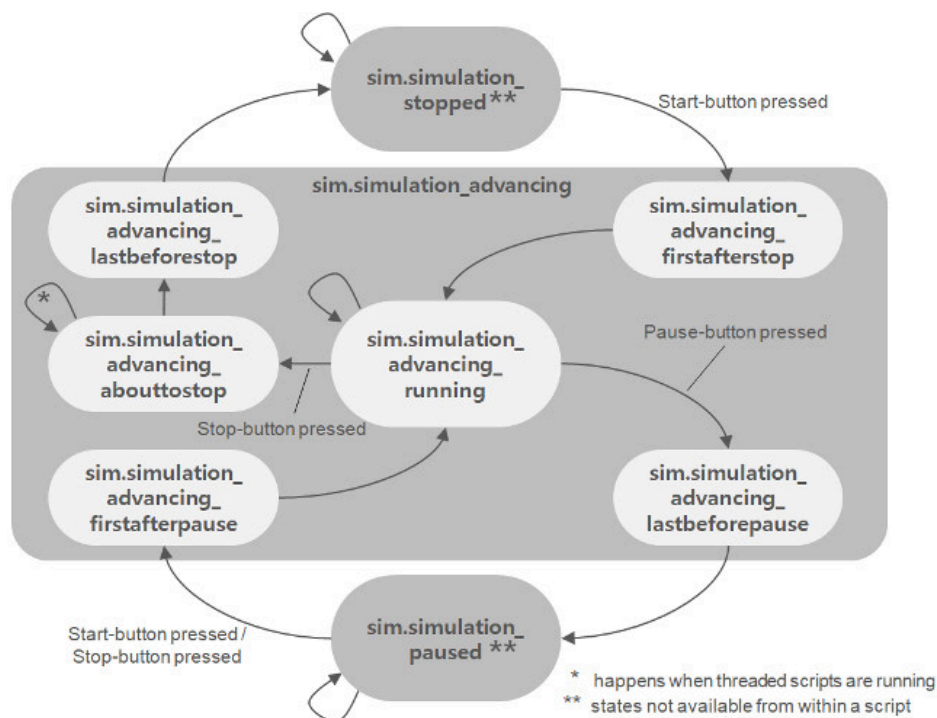
<sup>3</sup>) Lua scripts are executed in CoppeliaSim's main thread, Python scripts are executed in separate processes

<sup>4</sup>) Stepped as in *synchronized* with each simulation step

## 12.6. Simulació

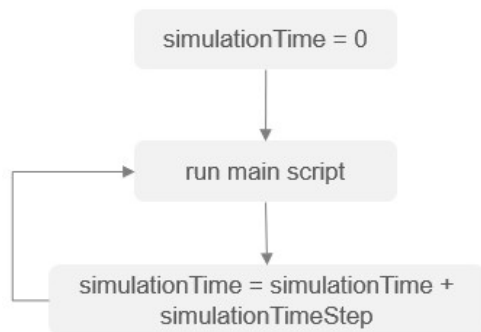
Una simulació a CoppeliaSim es pot iniciar, aturar i aturar amb [Simulation > Start/Pause/Stop simulation] o mitjançant els botons de la barra d'eines relacionats.

Internament, el simulador utilitzarà estats intermedis addicionals per tal d'informar correctament els scripts o programes sobre el que passarà a continuació. El diagrama d'estat següent il·lustra els estats interns del simulador:

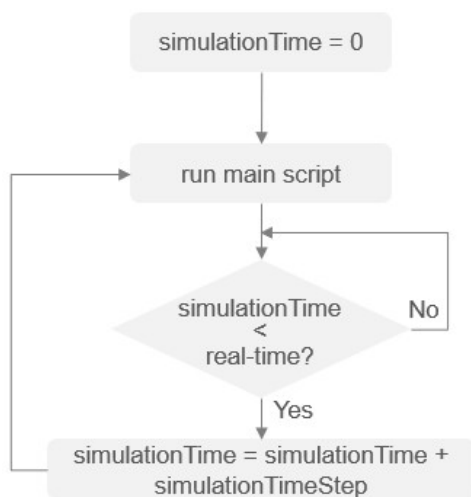


## 12.7. Bucle de simulació

El simulador funciona avançant el temps de simulació a passos de temps constants. La figura següent il·lustra el bucle de simulació principal:

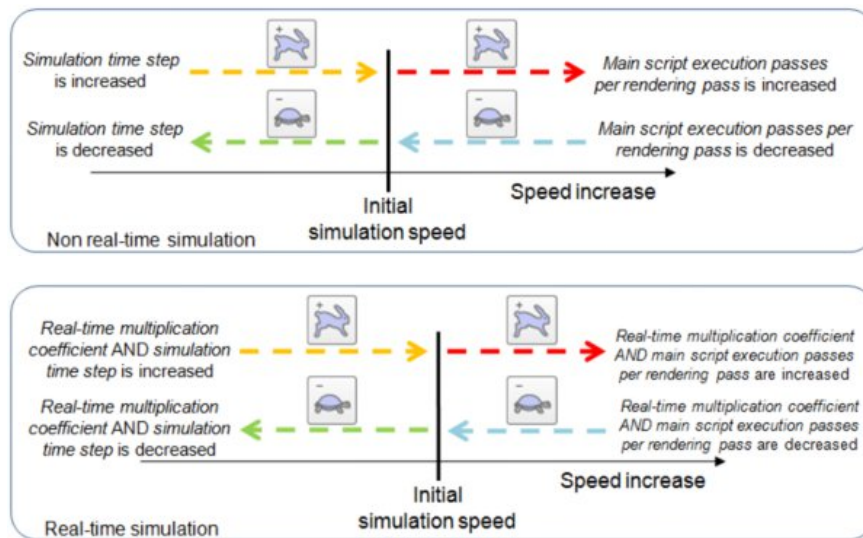


També s'admet la simulació en temps real, intentant mantenir el temps de simulació sincronitzat amb el temps real:



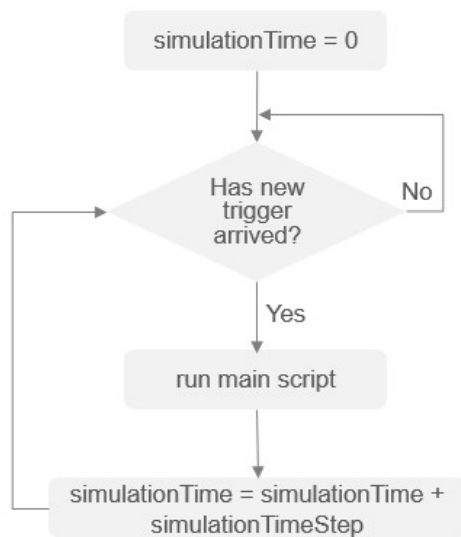
## 12.8. Velocitat de simulació

Les figures següents il·lustren els mecanismes de control de la velocitat de simulació.



## 12.9. Mode síncron

De manera predeterminada, CoppeliaSim executa una simulació fent un pas de simulació rere un altre, automàticament. Tanmateix, hi ha moltes situacions en què és important poder activar manualment cada pas de simulació, per exemple, per inspeccionar cada pas de simulació individualment, o per sincronitzar CoppeliaSim amb una aplicació externa. Per això hi ha aquest mecanisme, que és el mode de pas (o mode síncron):





## 12.10. Tutorials

El [manual de CoppeliaSim](#) inclou la següent col·lecció de tutorials.

- [BubbleRob tutorial](#)
- [Building a clean model tutorial](#)
- [Line following BubbleRob tutorial](#)
- [Inverse kinematics tutorial](#)
- [External controller tutorial](#)
- [Plugin tutorial](#)
- [Robot language interpreter integration tutorial](#)
- [ROS tutorial](#)

## 13. Per a saber-ne més

Tancam el llibre d'aquest lliurament amb una llista d'experts en robòtica.

El seu treball permet seguir el tema d'aquest lliurament i aprofundir-hi.

- Rodney Brooks: Científic informàtic australià, pioner en IA i dissenyador de robots autònoms, conegut per fundar iRobot i desenvolupar la robòtica basada en el comportament. Anca Dragan: Roboticista especialitzada en interacció humà-robot i interacció algorítmica humà-robot.
- David Hanson: Fundador i CEO de Hanson Robotics, conegut per crear robots humanoides realistes, com ara la famosa Sophia.
- Hiroshi Ishiguro: Roboticista japonès reconegut per crear robots humanoides altament realistes, incloent l'androide Geminoid HI-1 a la seva pròpia semblança.
- Hans Moravec: Roboticista pioner que va desenvolupar el mapatge de graella d'ocupació i va contribuir a la navegació i percepció de robots mòbils.
- Robert Playter: CEO de Boston Dynamics, empresa líder en desenvolupament de robots mòbils avançats com Spot, Atlas i Stretch.
- Sebastian Thrun: Científic informàtic i roboticista conegut pel seu treball en robòtica probabilística i cotxes autònoms.
- Carme Torras: Roboticista catalana centrada en la robòtica assistencial i les implicacions ètiques dels robots socials.
- Raquel Urtasun: Científica informàtica especialitzada en aprenentatge automàtic per a tecnologia de conducció autònoma i comprensió d'escenes 3D.