مقدمة قصيرة جدًا

آلان وينفيلد

علم الروبوتات

ترجمة أسماء عزب

علم الروبوتات

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
آلان وينفيلد

ترجمة
أسماء عزب

مراجعة
الزهراء سامي

هنـــداوي

علم الروبوتات

آلان وينفيلد

Robotics

Alan Winfield

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٠ ٣١٠٢ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٢.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر جامعة أكسفورد.

Copyright © Alan Winfield 2012. *Robotics* was originally published in English in 2012. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Hindawi Foundation is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

المحتويات

شكر وتقدير	٧
تمهيد	٩
١- ما الروبوت؟	١٣
٢- ما تفعله الروبوتات الآن	٣١
٣- الروبوتات الحيوية	٥٣
٤- الروبوتات التي تشبه البشر والروبوتات البشرية	٧١
٥- أسراب الروبوتات، والتطور، والتكافل	٩٣
٦- مستقبل علم الروبوتات	١١٥
مسرد المصطلحات	١٣٥
قراءات إضافية	١٣٧
مصادر الصور	١٤١

شكر وتقدير

أودُّ أولًا أن أعبِّر عن تقديري لجميع العلماء والمهندسين الذين اخترعوا وصنعوا الروبوتات الرائعة التي يَرِد ذِكرها في هذا الكتاب، ومن دواعي سروري أنني أعرف بعضهم وأعمل معهم. فمن دون مجهوداتكم لما كان هناك كثير لقوله في هذا الكتاب.

وأودُّ أن أُعرِب عن امتناني لمجلس أبحاث الهندسة والعلوم الفيزيائية لدعمه مشاركاتي العامة. فقد أتاح لي هذا الدعم فرصًا رائعة لتقديم علم الروبوتات إلى مجموعة كبيرة من الأشخاص؛ وقد حاولت في هذا الكتاب الإجابة عن كثير من الأسئلة التي طرحوها.

أودُّ أن أشكر دار نشر جامعة أكسفورد على التحلي بالصبر في دعمي ونصحي خلال إعداد هذا الكتاب منذ أن كان فكرة في رسالة بريد إلكتروني وحتى طباعته. كما أنني مَدِين للمراجعين المجهولين في دار نشر جامعة أكسفورد لتعليقاتهم الثاقبة التي جعلتني أفكر حقًّا، خاصةً بشأن كلمة «ذكي» المستخدَمة مع الروبوتات.

أعبِّر عن امتناني الشديد لكيرستين إيدير، وليليان إدواردز، وأوين هولاند، ويوانِس يروبولس، وكريس ميليش، وروجر مور، ومارتن بيرسون، وآدم سبيرز، وذلك لمراجعة أجزاء من النص للتحقق من دقته. وأقدِّم جزيل شكري لمارينا ستراينكوفسكي التي نقحت المسوَّدة النهائية بوصفها واحدة من القُرَّاء المستهدَفين.

تمهيد

ربما لا تدرك ذلك، لكنك تعتمد على الروبوتات في كل يوم. الروبوتات على الأرجح هي التي صنعت سيارتك والغسالة التي تستخدمها. وعندما تطلب سلعةً ما عبر الإنترنت، من المحتمل أيضًا أنَّ أحد الروبوتات يُحضرها من المخزن. ثَمَّة احتمال أيضًا في أن يكون الغاز الطبيعي الذي يشغِّل التدفئة المركزية في منزلك، قد استخرجته روبوتات من بئر غاز تحت سطح البحر. وحتى القطارات الكهربائية، التي تعمل دون سائق ويَستقلُّها المسافرون للتنقل بين مباني الصالات في أيٍّ من المطارات الدولية، تُعتبر مركباتٍ روبوتية. ولعل أكثر ما يثير الدهشة أن الحليب الموجود على طاولة مطبخك قد أتى على الأرجح من أبقار حلبتها روبوتات.

ما تشترك فيه هذه الروبوتات جميعًا هو أنها تعمل خلف الكواليس، بعيدًا عن الأنظار في معظم الأحيان. ولهذا، فعلى الرغم من أهميتها، لا يدرك معظم الناس دورها الرئيسي في العالم الحديث، وهم لم يروا قَط روبوتًا حقيقيًّا «معدنيًّا» يعمل.

لكن هذا يتغير الآن. فثَمَّة جيل جديد من الروبوتات يجري تصميمه في الوقت الحالي للتفاعل مع البشر وجهًا لوجه. وعلى عكس نظائرها الصناعية، ستكون هذه الروبوتات صديقة للإنسان وتتمتع بقدر أكبر من الذكاء؛ وهو أمرٌ ضروري لسلامتها. وسوف يصبح من الممكن لهذه الروبوتات أن توفر للبشر دعمًا ماديًّا مباشرًا، بوصفهم زملاءهم في العمل أو رفقاءهم.

يمكننا التنبؤ بأنه بحلول عام ٢٠٢٠، ستمتلك العديد من المنازل روبوتًا واحدًا أو أكثر، وربما سيارة من دون سائق، والعديد من روبوتات التنظيف، وروبوتًا تعليميًّا أو ترفيهيًّا. وبعد عدة سنوات، يمكن لروبوت البستنة أن يتولى أمر الأعشاب الضارَّة والآفات

في الحدائق. وبحلول عام ٢٠٢٥، قد تصبح الروبوتات المحدودة الوظائف المصمَّمة للرفقة، حقيقة وأمرًا عاديًّا.

إذا طلبت اليوم من أي شخص أن يفكر في روبوت، فمن المحتمل أنه سيفكر في روبوت من فيلم: ربما «آر تو دي تو» أو «سي ثري بي أو» من أفلام «حرب النجوم» (ستار وورز)، أو سوني من فيلم «أنا، الروبوت» (آي، روبوت)، أو الروبوت من الفيلم الذي أنتجته ديزني بعنوان «وول-إي». المشكلة إذَن أن توقعاتنا عن ماهية الروبوتات، أو ما ينبغي أن تكون عليه، تعتمد على الخيال أكثر من الواقع. لقد مرَّ تسعون عامًا منذ المرة الأولى التي استخدم فيها الكاتب المسرحي التشيكي كارل تشابيك كلمة «روبوت» لوصف إنسان آلي في مسرحيته «روبوتات روسوم العالمية» (روسومز يونيفرسال روبوتس)، ولا تزال الكلمة في أذهان العديد من الأشخاص مُرادفًا لإنسان آلي ذكي.

لا يدور هذا الكتاب عن علم النفس أو الأنثروبولوجيا الثقافية للروبوتات، رغم أنها موضوعات مثيرة للاهتمام. لكنني مهندس وأخصَّائي روبوتات؛ لذلك أكتفي بدراسة تكنولوجيا الروبوتات المادية الحقيقية وتطبيقاتها. وفقًا لقاموس أكسفورد للغة الإنجليزية، يُعرَّف علم الروبوتات بأنه دراسة تصميم الروبوتات وتطبيقاتها واستخداماتها، وهذا بالضبط ما تتحدث عنه هذه المقدمة القصيرة جدًّا: ما تفعله الروبوتات وما يفعله علماء الروبوتات.

يبدأ هذا الكتاب بطرح السؤال الآتي: «ما الروبوت؟» في الفصل الأول، أقدِّم روبوتًا حقيقيًّا وأستخدمه لوصف الأجزاء المهمة في جميع الروبوتات، مثل: الاستشعار (عيون الروبوتات أو قدرتها على اللمس)، والحركة (أيدي الروبوتات، أو أذرعها، أو سيقانها)، والذكاء (أدمغة الروبوتات). يتيح لنا هذا الإطار تحقيق غرضَين. فهو يسمح لنا بتشييد ما يشبه شجرة العائلة التي يمكننا أن نضمَّ لها الروبوتات الحالية التي أعرضها في الفصل الثاني. ويساعدنا على فهم نقاط قوة الروبوتات الحالية وأوجه القصور لديها، إضافةً إلى فهم السبب في أنَّ إمكانية الحصول على روبوتات ذكية حقًّا في الوقت الحاضر محضُ احتمال مستقبلي.

لقد شهدت السنوات الخمس والعشرون الماضية تغييرًا جذريًّا في اتجاه البحث والتطوير في مجال علم الروبوتات، نتج عن التحدي المتمثل في تصميم روبوتات ذكية. يمكن وصف هذا التغيير بعبارة «الإلهام الأحيائي». وفي الفصل الثالث سأناقش الروبوتات المستوحاة من علم الأحياء وما يعنيه ذلك بالنسبة للروبوتات بشكل عام، موضِّحًا بالأمثلة

الروبوتات التي تحصل على طاقتها من الطعام والروبوتات التي تستند في تصميمها إلى الجرذان.

صحيحٌ أن الغالبية العظمى من الروبوتات الموجودة في العالم اليوم لا تشبه البشر، إلا أن الروبوتات التي صُممت لتُشبِهنا تتمتع بسحر خاص. فهي أقرب إلى تصورنا عن الروبوت بوصفه إنسانًا آليًّا. وفي الفصل الرابع، أذكر الأعمال المكرَّسة للروبوتات التي تُشبِه البشر بوصفها رفاقًا أو مساعدين في مكان العمل، موضِّحًا ذلك بأمثلة من روبوتات تُشبِه البشر يتدرج شكلها من الرسوم الكارتونية إلى الشكل الواقعي للبشر. إضافةً إلى ذلك، أعرض الخطوط العريضة لمشكلات سلامة الروبوتات، وموثوقيتها، وأخلاقياتها.

وفي الفصل الخامس، أذكر عددًا من الاتجاهات السائدة في أبحاث علم الروبوتات الحالية. ولا يشمل ذلك أنواعًا جديدة من الروبوتات فحسب، بل يشمل أيضًا طرقًا جديدة جذرية لتصميم الروبوتات. سوف أصف أنظمة أسراب الروبوتات، وهي أنظمة متعددة الروبوتات مستوحاة من الحشرات الاجتماعية. بعد ذلك، أتناول الخطوط العريضة لعلم الروبوتات التطوري، وهو منهج جديد من مناهج التصميم يسمح بتطور الروبوتات اصطناعيًّا باستخدام عملية تشبه نظرية داروين للتطور.

أما السؤال الذي يحظى باهتمام كبير من الجمهور، فهو «إلى أين يتجه علم الروبوتات؟» ويتناول الفصل الأخير مسألة مستقبل علم الروبوتات من خلال تحليل المشكلات التقنية التي يجب حلها من أجل تصميم ثلاثة أنظمة روبوتية تعتمد على «التجارب الفكرية»: عالم كواكب مستقل، وسِرب من الروبوتات الطبية الدقيقة، وروبوت بشري رفيق.

ومثل أي تقنية تؤدي إلى تغيير كبير، يحمل علم الروبوتات في طيَّاته آمالًا واعدة ومخاطر كبيرة. ويكمُن أحد أهداف هذا الكتاب في تزويد القارئ بالفهم الكافي للوصول إلى رأي مستنير بشأن ما لا ينبغي أن تكون عليه الروبوتات، لا ما يمكن أن تكون عليه في الواقع فحسب.

إنَّ علم الروبوتات مجال كبير، وأنا على دراية تامة بأنَّ هذه المقدمة القصيرة لا تتضمن بعض الجوانب المهمة في علم الروبوتات. ولذلك أقدِّم اعتذاري إلى زملائي من المتخصصين في علم الروبوتات الذين لم أتحدَّث كثيرًا عن مجالات عملهم، أو تغاضيت عنها تمامًا. إنني أعلن بصراحة ودون خجل أنَّ هذا الكتاب يعرض وجهة نظري الشخصية؛ يعود هذا جزئيًّا إلى أن الأفضل لأن يكتب المرء ما يعرفه، لكن الأهم من ذلك أن الأسئلة المهمة في مجال علم

الروبوتات لا تزال مثيرة للجدل. فما تزال الأسئلة الأساسية مثل «ما تعريف الروبوت؟» و«متى يمكن تصنيف الروبوت بأنه ذكي؟» بحاجة إلى إجابة. وبناءً على هذا، على الرغم من أنني آمل أن يقدِّم هذا الكتاب تمثيلًا حياديًّا للمجال، فإن القيم والأحكام التي قدَّمتها فيما يتعلق بالتطورات المختلفة في مجال الروبوتات نابعة من رأيي الشخصي.

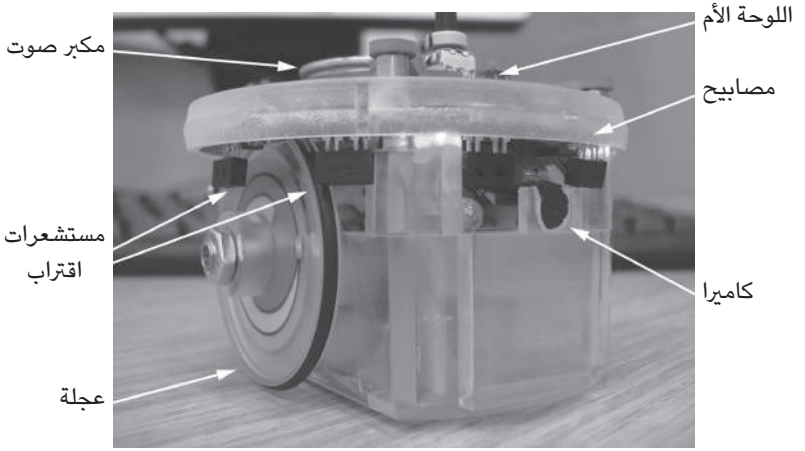
الفصل الأول

ما الروبوت؟

يُوضِّح الشكل ١-١ أحد روبوتات إي-باك. الحق أنَّ إي-باك لا يُعَد روبوتًا حقيقيًّا، لكنه أيضًا ليس لعبة. إن إي-باك، الذي صمَّمه فرانشيسكو موندادا وزملاؤه في المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا في لوزان، سويسرا، لأغراض دراسية وبحثية في مجال الروبوتات المتحركة، هو روبوت صغير متحرك مزوَّد بعجلات؛ ومن ثَم فهو مرشَّح جيد لنا للنظر إلى روبوت من الداخل. ويُعَد إي-باك أيضًا روبوتًا مفتوحَ المصدر؛ مما يعني أن جميع خُططه وبرامجه متاحة مجانًا.

بالنظر إلى إي-باك، ستلاحظ أن الروبوت له عجلتان، يدفعهما محرِّكان كهربائيان. في هذه الصورة، لا يمكننا سوى رؤية العجلة الموجودة في الجانب الأيمن، لكن توجد عجلة أخرى أيضًا في الجانب المقابل. يمكن لهذا الروبوت التحرك إلى الأمام والخلف والدوران وزيادة السرعة أو إبطاؤها. ويحتوي الروبوت إي-باك على كاميرا أمامية (مُماثِلة لتلك الموجودة في الهواتف المحمولة)، ويحيط بجسمه ثمانية «مستشعرات اقتراب». تستخدم مستشعرات الاقتراب ضوء الأشعة تحت الحمراء لاستشعار اقتراب الأشياء من جسم الروبوت — في نطاق سنتيمتر واحد أو اثنين — لذا فهي تمنح الروبوت شيئًا يشبه حاسة اللمس.

وعلى الرغم من عدم ذكر ذلك في الشكل ١-١، فإنَّ إي-باك يحتوي أيضًا على ثلاثة ميكروفونات وجهاز يُسمى مقياس التسارع يمنح الروبوت شيئًا أشبه بالإحساس بالتوازن، مثلما تفعل أُذنك الداخلية. ومقارنةً بصغر حجمه، فإنَّ جهاز الحس لدى إي-باك غني بشكل مُدهِش. فبإمكانه أن يرى بالكاميرا، ويسمع بالميكروفونات، ويستشعر وجود الأشياء القريبة من حوله باستخدام مستشعرات الاقتراب، ويستشعر الصدمات



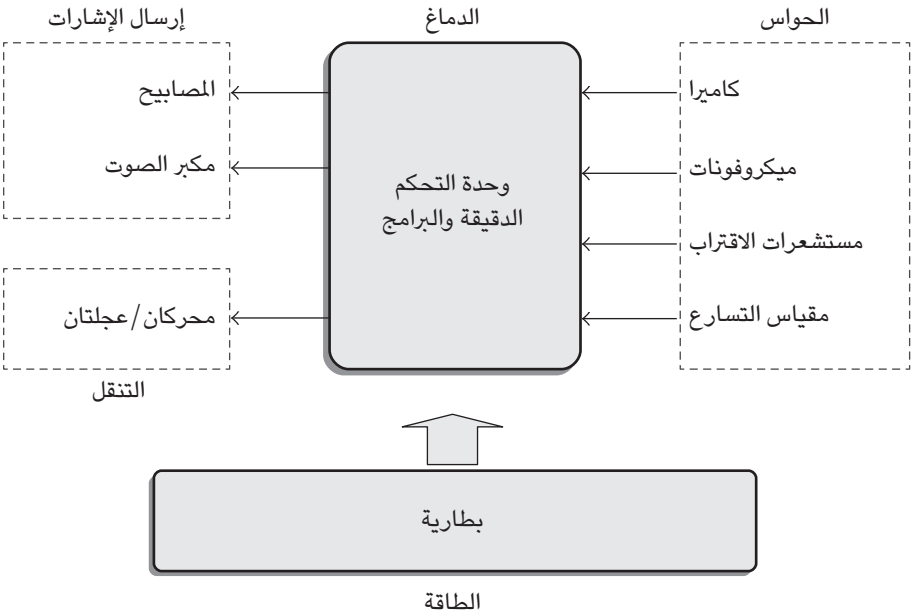
شكل ١-١: الروبوت المتنقل التعليمي إي-باك

(مثل الاصطدامات المفاجئة) بمقياس التسارع الخاص به. ويمكن للروبوت إي-باك إرسال إشارات (على سبيل المثال، إلى روبوتات إي-باك الأخرى)، وذلك من خلال حلقة تحيط بجسمه وبها ثمانية مصابيح، أو عن طريق إصدار أصوات باستخدام مكبِّر الصوت

أخيرًا، يحتوي إي-باك على كمبيوتر ذي شريحة واحدة، يُسمى وحدة التحكم الدقيقة، وهو يوجد على اللوحة الأم أسفل مكبِّر الصوت. ويمكننا النظر إلى وحدة التحكم الدقيقة باعتبارها الجهاز العصبي المركزي لإي-باك. ذلك أنها تتصل بكلا المحرِّكَين ومستشعرات الإدخال وأجهزة إرسال الإشارات التي أشرت إليها. ثم إنَّ وحدة التحكم الدقيقة، إضافةً إلى أنظمة برمجتها، هي ما يجعل الروبوت يعمل بالفعل؛ إنها في الواقع «دماغ» الروبوت. يُوضِّح الشكل ١-٢ تنظيم «الجهاز العصبي» لدى الروبوت إي-باك.

(١) التاريخ الطبيعي للروبوت إي-باك

إن الموطن الأصلي للروبوت إي-باك هو موطن اصطناعي: الصفوف الدراسية لعلم الروبوتات ومختبرات الأبحاث. فما الذي يفعله إي-باك في الواقع عندما يكون في موطنه؟ وكيف يستجيب إي-باك للمحفِّزات، وما سماته أو سلوكياته المحددة؟



شكل ١-٢: «الجهاز العصبي» للروبوت إي-باك

أول ما يجب أن نفهمه عن الروبوت إي-باك هو أنه، من دون برامجه، لا يفعل أي شيء على الإطلاق. وهذه ملاحظة مهمة للغاية؛ لأنها تنطبق على جميع الروبوتات تقريبًا. وما أعنيه بالبرامج هنا هو برنامج التحكم المثبَّت في وحدة التحكم الدقيقة — «الدماغ» — الخاصة بإي-باك. فمن دون برنامج التحكم هذا، ليس إي-باك إلا قشرةً فارغة، جثة هامدة بلا عقل. فبرنامج التشغيل هو ما يبثُّ الروح في الروبوت ويمنحه الحياة (الاصطناعية).

من الواضح أيضًا أن القدرات الجسدية للروبوت إي-باك محدودة. ذلك أنها تقتصر على تحريك نفسه، وهو حتى لا يستطيع التحرك إلا على الأسطح المستوية أو الأسطح الناعمة الطفيفة الانحدار. وعلى عكس العديد من الروبوتات، لا يمكن للروبوت إي-باك التقاط الأشياء أو وضعها جانبًا؛ فهو ليس مزوَّدًا بـ «قابض» ليؤدي وظيفة اليد.

إذا كان لنا أن نلاحظ روبوتات إي-باك في ميدانها التجريبي، فقد نرى مجموعة منها في حركة مستمرة، وهي يتحرك بعضها بالقرب من بعض لكنها لا تصطدم أبدًا. وتمامًا

مثل سرب من البراغيش، يبدو أن روبوتات إي-باك تتحرك عشوائيًّا بعضها حول بعض، لكنها تظل معًا. وقد يستنتج عالم طبيعة الروبوتات أنها ليست كائنات منعزلة، بل توجد على الأرجح في مجموعات، مثل الحشرات الاجتماعية.

ومن خلال المراقبة الدقيقة لأفراد روبوتات إي-باك داخل هذه المجموعة، قد يستنتج عالم طبيعة الروبوتات أنها تستخدم أجهزة الاستشعار الخاصة بها لاكتشاف ما إذا كانت على وشك الاصطدام أو على وشك مغادرة المجموعة، وأنها تستخدم محركاتها لتتحرك وتدور.

وقد يتساءل عالم طبيعة الروبوتات عن السبب الذي يجعل الروبوتات تتصرف بهذه الطريقة. وسيلاحظ أن روبوتات إي-باك لا تخضع للتحكم عن بُعد. فلا حاجة إلى أي تدخُّل بشري على الإطلاق بينما هي منشغِلة في التحرك هنا وهناك. على غرار الحيوانات الحقيقية، تتصرف الروبوتات بشكل مستقل. فالبرنامج الموجود في وحدة التحكم الدقيقة، «الدماغ»، هو ما يعطي روبوت إي-باك سلوكياته الأساسية.

ليست روبوتات إي-باك مستقلة تمامًا بطبيعة الحال. فهي تحصل على طاقتها من بطارية، وعندما تنفد البطارية يتوقف الروبوت ببساطة عن العمل. ولهذا، فالروبوتات أشبه في حقيقة الأمر بالحيوانات الموجودة في حديقة الحيوانات؛ إذ تعتمد على البشر في «إطعامها»؛ أي تغيير بطارياتها. ينطبق هذا الأمر على الغالبية العظمى من الروبوتات، وحتى الروبوتات المتصلة بإمدادات الطاقة الرئيسية تعتمد على شبكة الكهرباء للحصول على الطاقة.

(٢) مِمَّ يتكون الروبوت؟

في الشكل ١-٢ الذي يُوضِّح الجهاز العصبي لروبوت إي-باك، جمعتُ «مستشعرات» إي-باك معًا، والمستشعرات هي الأشياء التي يستخدمها للإحساس بالعالم من حوله. وجمعتُ أيضًا الأشياء التي يستخدمها ليرسل الإشارات إلى الروبوتات الأخرى، تحت مسمَّى «إرسال الإشارات»، وعلى محرِّكَيه وضعت عنوان «التنقل». ينبع «ذكاء» روبوت إي-باك من وحدة التحكم الدقيقة والبرنامج الذي يعمل عليها. ويحتاج إي-باك إلى مصدر للطاقة يأتي من بطاريته. وأخيرًا — وربما الأهم من ذلك كله — يتمتع إي-باك بجسد: الهيكل البلاستيكي الشفَّاف الموضَّح في الشكل ١-١.

بعض من هذه الوظائف الخمسة أو كلها — الاستشعار وإرسال الإشارات والتحرك والذكاء والطاقة، مدمَجة في جسد — موجودة في جميع الروبوتات. ويعتمد تصميم المستشعرات الفعلية، والمحركات، والسلوكيات في جسم روبوت معين، على الوظيفة التي صُمم الروبوت للقيام بها. وهذه العناصر جميعها معًا هي ما يحدد ماهية الروبوت. فإدراك أن جميع الروبوتات مصنوعة من المكونات ذاتها يعطينا إطارًا لفهم تصميم فرادى الروبوتات وكيف أنها تختلف عن غيرها. وسيساعدنا هذا الإطار أيضًا على فهم نقاط القوة وأوجه القصور الموجودة في الروبوتات الحالية.

يُصنِّف الجدول ١-١ الوظائف التي تُشكِّل روبوتًا، بوجودها معًا، ويقسم كلًّا منها إلى أنواع مختلفة. تحتوي جميع الروبوتات التي أعرضها في بقية هذا الكتاب على مزيج من الوظائف الواردة في الجدول ١-١. ولكل نوع من الوظائف، يذكر الجدول كلًّا من الجهاز الاصطناعي (سواء إلكتروني، أو ميكانيكي، أو برمجي) الذي يُستخدم عادةً لتنفيذ هذه الوظيفة، جنبًا إلى جنب مع ما يعادله في الحيوانات والبشر. غير أنَّ عددًا من أنواع وظائف الروبوتات ليس له مكافئ بيولوجي؛ ومن الأمثلة الواضحة على ذلك عدم وجود حيوان يتحرك على عجلات. وبالمثل أيضًا، لا يوجد استخدام بيولوجي معروف للتواصل اللاسلكي.

إنَّ هذه المقارنة غير العلمية على الإطلاق توحي بأن الروبوتات يمكن أن تمتلك من الحواس أو من وسائل إصدار الإشارات نطاقًا أكبر مما تمتلكه الحيوانات، وهذا صحيح. بالرغم من ذلك، فإنَّ كفة الميزان ترجح بقوة مرةً أخرى لصالح الحيوانات عندما نضع في الاعتبار أن الحاسة المكافئة لدى الحيوان تتفوق تفوقًا كبيرًا على كل جزء من الروبوت. فعلى سبيل المثال، نجد أنَّ حاسة البصر واللمس والشم لدى الحشرات، أفضل بكثير مقارنةً بنظيراتها لدى الروبوتات. فالروبوتات من جميع النواحي تقريبًا محاكاة بدائية للحيوانات.

لم أتحدث حتى الآن عن الجزء الأكبر من أي روبوت، وهو: جسمه، الهيكل الميكانيكي الذي تُركَّب عليه جميع الأجزاء الأخرى. ويُعرف تخطيط شكل الروبوت وتكوينه الجسدي، وتحديد موضع أجهزة الاستشعار، والعجلات (أو الأرجل أو الأجنحة)، والأذرع، إن وُجدت، بعلم التشكل (المورفولوجيا). ولا بد من تصميم مورفولوجيا الروبوت بعناية فائقة بحيث يكون مناسبًا للغرض الذي صُمم من أجله. ومن سوء الحظ أن المواد وطرق التصنيع التي نستخدمها لتصنيع أجسام الروبوتات، وهي معدنية أو بلاستيكية في أغلب الأحوال، هي أيضًا بدائية مقارنةً بمثيلاتها الحيوانية. وغالبًا ما يشعر علماء الروبوتات بالإحباط بسبب هذه القيود، لكن مع التقنيات الجديدة مثل الطباعة الثلاثية الأبعاد، بدأنا نرى روبوتات ذات أجسام «عضوية» أكثر تطورًا.

جدول ١-١: وظائف الروبوتات وما يعادلها في الطبيعة.

الوظيفة	النوع	الطبيعي/البيولوجي	الروبوت/الاصطناعي
الاستشعار	الرؤية	العيون	الكاميرات
	السمع	الأذن	الميكروفونات
	التوجه (نسبي)	الجهاز الدهليزي	مقياس التسارع
	التوجه (مطلق)	البوصلة المغناطيسية (الطيور المهاجرة)	البوصلة الإلكترونية
	الشم	الأنف	الأنف الإلكتروني
	الاستشعار قصير المدى	مستشعرات الحرارة (الثعبان)	مستشعرات الأشعة تحت الحمراء
	اللمس (الجلد)	الجلد	الجلد الاصطناعي
	اللمس (الشارب)	الشوارب/الشعر على الجلد	الشوارب الاصطناعية
	الاستشعار طويل المدى	تحديد الموقع بصدى الصوت (الوطواط)	الموجات فوق الصوتية/الرادار
	الاستشعار طويل المدى	لا يوجد	ماسح ضوئي بالليزر
	استشعار المواقع	لا يوجد	جهاز تحديد المواقع
إرسال الإشارات	الأضواء	اللون (الحرباء)	مصابيح إضاءة/مصابيح ثنائية باعثة للضوء
	الصوت	الصوت	مكبر صوت
	إيماءات (الوجه)	تعابير الوجه	جلد مزود بحركات
	إيماءات (الجسد)	حركات الجسد	محركات
	الاتصال اللاسلكي	لا يوجد	واي فاي أو بلوتوث
التنقل	عجلات	لا يوجد	محركات وعجلات
	أرجل	عضلات وأرجل	محركات وأرجل
	طيران	عضلات وأجنحة	محركات وأجنحة

الوظيفة	النوع	الطبيعي/البيولوجي	الروبوت/الاصطناعي
التحكم في المواد	مهارات حركية كبيرة	عضلات وأذرع	محركات وأذرع
	مهارات حركية دقيقة	أيدي وأصابع	قابض (قوابض)
الطاقة	طاقة كهربائية	لا يوجد	إمدادات الطاقة الرئيسية
		لا يوجد	البطاريات
		لا يوجد	ألواح الطاقة الشمسية
		المعدة	خلايا الوقود
الذكاء	وحدة التحكم	الدماغ (المادة)	وحدة (وحدات) معالجة دقيقة
	السلوكيات	العقل (التصور والإدراك)	البرامج (برامج التحكم)
الهيكل		عظام، غضاريف، هيكل خارجي	معدن وبلاستيك

على الرغم من أوجه القصور التي أوضحتها، فإن المكوِّنات الأساسية ذاتها موجودة في الحيوانات مثلما هي موجودة في الروبوتات. فهل يعني هذا أن الروبوتات على قيد الحياة؟ يعتقد بعض علماء الروبوتات أن روبوتاتهم حيوانات اصطناعية، وثَمَّة فرع من فروع الدراسة نشأ من الذكاء الاصطناعي وعلم الروبوتات يُسمى «الحياة الاصطناعية». لكن أيًّا من علماء الروبوتات لن يدَّعي أن الروبوتات التي يُصمِّمها أكثر من مجرد محاكاة لبعض الجوانب المحدودة من الحياة أو الذكاء.

لا شك أنَّ بعض الروبوتات قد تُصدِر سلوكيات أو تستجيب للمحفِّزات بشكل مُفعَم بالحياة؛ مما يجعلها تبدو كما لو كانت على قيد الحياة، غير أنه لا توجد روبوتات حية في حقيقة الأمر. وفيما يأتي ثلاثة أسباب وجيهة لذلك: لا تستطيع الروبوتات أن تحافظ على بقائها ذاتيًّا (أي تحصل على الطاقة)؛ وهي لا تستطيع أن تنمو أو تصلح جسدها (أي تتعافى)؛ ولا هي تستطيع أيضًا إنتاج نُسخ من نفسها (أي تتكاثر). إن أصبحت الروبوتات

قادرة على فعل هذه الأشياء كلها، حينها فقط سيتعين علينا التفكير بجِدِّية في مسألةِ ما إذا كانت على قيد الحياة أم لا. بالرغم من ذلك، توجد استثناءات لواحدة من هذه القواعد: منها مثلًا، الروبوت إيكوبوت، الذي يمكنه الحصول على الطاقة من هضم الطعام، وسنَرِد وصفه في الفصل الثالث.

(٣) ما تعريف الروبوت؟

الآن بعد أن نظرنا فيما يجعل الروبوت يؤدي وظائفه، يمكننا التفكير في تعريف أعم للروبوت ككلٍّ. وفيما يأتي ثلاثة تعريفات مفيدة كلها؛ لأنها تُسلِّط الضوء على الصفات الأساسية المحددة للروبوتات.

الروبوت هو:

(١) جهاز اصطناعي يمكنه استشعار بيئته والعمل في تلك البيئة على نحو هادف.
(٢) الروبوت ذكاء اصطناعي مُتجسِّد.
(٣) الروبوت آلة يمكنها الاضطلاع بأعمال مفيدة بشكل مستقل.

تتمثل أهمية التعريف الأول في أنه يصف الروبوت في سياق تفاعلاته مع بيئة عمله: عالمه. والكلمتان الأساسيتان هنا هما «استشعار» و«العمل»، وهما يشيران إلى مستشعرات الروبوت، وعيونه وآذانه الإلكترونية، ومحركاته، التي يمكنه من خلالها معالجة عالمه أو التحرك فيه. وكلمة «هادف» مهمة أيضًا؛ لأنه بدون أفعال مجدية وذكية بشكل ما، سيكون الروبوت بلا هدف أو وظيفة.

أما التعريف الثاني، فيبرز أن الروبوت هو ذكاء اصطناعي في هيئة جسد مادي. والذكاء الاصطناعي هو الشيء الذي يزود الروبوت بغايته من العمل، أي إدراكه؛ فمن دون الذكاء الاصطناعي، سيكون الروبوت محض هيكل ميكانيكي عديم الفائدة. يتكون جسم الروبوت من أجزاء ميكانيكية وإلكترونية، ومنها كمبيوتر دقيق، إضافةً إلى الذكاء الاصطناعي الناتج عن البرنامج الذي يعمل في الكمبيوتر الدقيق. إن نظير ازدواجية العقل والجسد لدى الروبوتات هي ازدواجية البرامج والأجهزة. فبرنامج الروبوت هو الشيء الذي يحدد مدى ذكاء سلوكيات الروبوت، أو ما إذا كانت لديه سلوكيات على الإطلاق.

علينا توخِّي الحذر هنا؛ لأن السلوك لا يتعلق بالبرمجة فحسب. فالسلوك هو ما ينجم عند تفاعل الروبوت مع بيئته، والحق أنَّ هذا يتعلق بمورفولوجيا الروبوت وبيئته بقدر

ما يتعلق بذكائه الاصطناعي. يرى علماء الروبوتات أن سلوك الروبوت شيء «ينبثق» من تفاعلات الروبوت مع بيئته التشغيلية. فعلى سبيل المثال، إذا كنا نصنع روبوتًا بإمكانه السير، وكانت لديه الأجهزة الضرورية (مثل الأرجل)، فإن برنامج الروبوت هو الذي سيحدد متى يمشي الروبوت للأمام أو يتوقف أو يستدير ولماذا. لكن السير الفعلي سيكون نتيجة لتفاعل أرجل الروبوت، الخاضعة لسيطرة البرنامج، مع السطح الذي يسير عليه.

يُركِّز التعريف النهائي على أن الروبوت يجب أن يكون مفيدًا. فالروبوتات مناسبة للوظائف التي قد نعتبرها مملة أو قذرة أو خطيرة. ولهذا سنجد أنَّ العديد من الروبوتات تؤدي وظائف تتسم بدرجة كبيرة من التكرار (على خطوط تجميع المصانع، على سبيل المثال)، أو في أماكن غير مناسبة للبشر (مثل أعماق البحار، أو في الفضاء)، أو تقوم بوظائف خطيرة (مثل المساعدة في إبطال مفعول قنابل مزروعة على جوانب الطرق). ربما يكون هذا التعريف هو الأقرب إلى معنى الكلمة التشيكية «روبوتا»، التي تعني حرفيًّا أعمال السُّخرة أو الأعمال الشاقَّة، والتي كانت مصدر الإلهام الأصلي لكلمة «روبوت».

(٤) استقلالية الروبوتات

ثَمَّة طريقة أخرى للتفكير في الروبوتات وتصنيفها، وهي حسب مستوى استقلاليتها. فالعديد من الروبوتات الفعلية، بما في ذلك بعض الروبوتات التي سأناقشها في الفصل الثاني، ليست مستقلة، وإنما يشغلها البشر عن بُعد. ومن الأمثلة على ذلك المَركبات الغواصة المشغَّلة عن بُعد، وهي من الروبوتات المستخدَمة للتنقيب تحت سطح البحر أو صيانة آبار النفط. وتُعرف هذه الروبوتات أيضًا باسم الروبوتات المشغَّلة عن بُعد.

لا تحتاج الروبوتات المشغَّلة عن بُعد إلا إلى الحد الأدنى من الذكاء المدمَج فيها؛ لأن «الذكاء» الرئيسي الذي يتحكم في الروبوت هو الإنسان. وتتمتع بعض الروبوتات المشغَّلة عن بُعد بمستوًى عالٍ من الذكاء الداخلي، ولا تستلزم تحكُّم مَن يُشغلها عن بُعد إلا في أوقات معيَّنة. على سبيل المثال، يمكن للطائرات بدون طيار أن تطير وحدها (على نظام الربَّان الآلي) حتى تصل إلى موقع محدَّد مسبقًا، وعندها يتولى الطيار البشري زمام الأمور. وفي بعض الأحيان تُعرف هذه الروبوتات بأنها شبه مستقلة.

عندما يتحدث علماء الروبوتات عن الروبوتات المستقلة، فإنهم عادةً ما يقصدون الروبوتات التي تقرر ما ينبغي فعله في الخطوة التالية دون أي تدخل أو تحكم بشري على الإطلاق. ولا بد هنا من توخِّي الحذر لأنهم لا يتحدثون عن الاستقلالية الحقيقية،

بمعنى أنها قادرة، مثلي ومثلك، على تقرير مصائرها، بل يتحدثون عما يمكن أن أُسميه «استقلالية التحكم». المقصود باستقلالية التحكم أن الروبوت يستطيع أداء وظيفته أو مهمته دون تدخل بشري، لكن الأمر بأداء هذه المهمة أو البرمجة على أدائها قد صدر من البشر على أي حال.

واقع الأمر أنَّ عددًا قليلًا للغاية من الروبوتات المستخدَمة الآن هي التي تتمتع بهذه الاستقلالية حتى في سياق هذا المعنى المحدود. ومن الأمثلة المرعبة على مثل هذا النوع من الروبوتات الصاروخُ الجوَّال، وهو «سلاح ذكي» قادر على توجيه نفسه إلى الهدف المخصص له دون تحكم بشري. لكنه يحتاج بالرغم من ذلك إلى مشغل بشري لمراقبة وحدة التحكم في الصاروخ وإيقافه إذا لزم الأمر.

ربما سيساعدنا أن نتخيل استقلالية الروبوتات على أنها نطاق واسع يتراوح بين التشغيل عن بُعد (بلا استقلالية) إلى الاستقلالية الكاملة. ويمكننا بعد ذلك تصنيف الروبوتات ضمن هذا النطاق وفقًا لدرجة استقلاليتها.

المربع ١: ما مدى ذكاء المِكنسة الروبوت؟

تحتاج المِكنسة الروبوت عادةً إلى خمسة سلوكيات مبرمَجة مسبقًا:

- استشعار العوائق وتجنُّبها، مثل الأثاث أو الجدران.
- استشعار أن بطاريتها على وشك النفاد، و«التوجه» إلى محطة إعادة الشحن لتوصيل نفسها بالكهرباء وإعادة الشحن.
- استشعار الحواف الموجودة أسفل مقدمة الروبوت والابتعاد عنها حتى لا يسقط من فوقها.
- استشعار أن جامع الغبار ممتلئ؛ ومن ثَم التوقف وإرسال إشارة (للإنسان) بأنه يحتاج إلى التفريغ.
- وفي حالة عدم وجود أيٍّ مما سبق، التقدم للأمام (أي أداء السلوك الافتراضي).

ما قد يبدو غريبًا هو أن هذه المجموعة من السلوكيات لا تشمل «تنظيف السجاد». الواقع أنَّ الروبوت ينظف السجاد الموجود تحته تلقائيًّا بينما يتحرك؛ ومن ثَم فإن السلوك الرئيسي لتنظيف السجاد هو «التقدم للأمام». بالطبع، تحتوي جميع الغُرف على جدران، ومعظمها يحتوي على أثاث؛ لذلك لا يستطيع الروبوت التقدم للأمام لفترة طويلة قبل أن يشعر بوجود عقبة؛ مما يستدعي السلوك الأول المذكور بالأعلى.

يحتوي الروبوت أيضًا على عدد من مستشعرات الاقتراب، وسيختلف سلوك «تجنب العقبات» قليلًا حسب المستشعر الذي تعرَّض للتحفيز. على سبيل المثال، إذا كان المستشعر الأمامي الأيسر هو

الذي تعرَّض للتحفيز، فسيَستدير الروبوت لليمين؛ وإذا أعاق شيءٌ ما المستشعر الأمامي الأيمن، فسيستدير الروبوت إلى اليسار. وإذا تعرَّض للتحفيز كلٌّ من المستشعر الأمامي الأيسر والمستشعر الأمامي الأيمن في الوقت ذاته، فلا بد أن الروبوت على وشك الاصطدام بشيءٍ ما أمامه؛ ولهذا سيتوقف ويبتعد. إذا كان الروبوت مستدير الشكل، فيمكنه ببساطة أن يدور بزاوية أكبر من ٩٠ درجة. وفي حالة اختلاف تلك الزاوية في كل مرة (أي إنَّ الروبوت يختار — في حدود معيَّنة — منعطَفًا عشوائيًّا)، فهذا يعني أنه كلما تعيَّن على الروبوت أن يتجنب شيئًا ما، فإنه سيستدير وينطلق في اتجاه جديد عبر الغرفة. وبهذه الطريقة، سيغطي الروبوت في النهاية الغرفةَ بأكملها ويُنظفها.

ربما يبدو أنَّ هذا النهج غير فعَّال للغاية، وهو كذلك بالفعل. فنمط حركة المكنسة الروبوت هو ما يُسميه علماء الروبوتات المشي العشوائي. وهذا يعني أن بعض أجزاء السجادة سيُنظَّف عدة مرات، في حين أن الأجزاء الأخرى ستُنظف مرةً واحدة فقط (أو قد لا تُنظَّف على الإطلاق إذا كنت سيئ الحظ للغاية). بالرغم من ذلك، فالأرجح أن الروبوت سيُنظف السجادة بالكامل بعد فترة من الزمن. أما الأسلوب الأكثر فاعلية، الذي يتذكر فيه الروبوت أجزاء السجادة التي نظفها بالفعل، أو يرسم «خريطة» للغرفة بحيث يمكنه وضعُ خطة لتنظيف الغرفة من أولها لآخرها، فسيتطلب أجهزة استشعار أكثر تعقيدًا وتكلفة، وقدرًا أكبر من «الذكاء»؛ مما يعني أن الروبوت سيكلف آلاف الجنيهات بدلًا من المئات. ثم إنَّ نهج الذكاء المنخفض، إضافةً إلى السلوكيات الخمسة المبرمَجة مسبقًا، تكفي لإتمام المهمة.

يجدر بي الآن أن أُوضِّح شيئًا عن الفرق بين كلمة المستقلة وكلمة ذاتية الحركة. فعلى الرغم من أن الكلمتين لهما معانٍ متشابهة في الواقع، يفضل علماء الروبوتات كلمة المستقلة لأنها أوسع نطاقًا وأكثر ثراءً من ذاتية الحركة، ويعتبر السعي لتحقيق قدر أكبر من الاستقلالية هدفًا مهمًّا في علم الروبوتات.

ما نقصده بكلمة ذاتية الحركة هو «العمل من خلال سلسلة ثابتة من الإجراءات المبرمَجة مسبقًا». ولهذا يوصف ذراع الروبوت المستخدَم في طلاء السيارات بالرش بأنه ذاتي الحركة، وهو يقع على الطرف الأدنى من مقياس الاستقلالية. لكن ماذا عن المكنسة الروبوت؟ صحيح أنه روبوت بسيط نسبيًّا، لكنه يتمتع بقدر كبير من الاستقلالية. والسبب هو أن أفعاله تحدد من خلال مدخلاته الحسية، وليس بسبب ترتيبها في سلسلة الإجراءات المبرمجة مسبقًا. فعند وضع عقبة أمام الروبوت، سيتَّخذ إجراء تجنبها. وفي حالة عدم وجود أي عوائق، سيواصل الروبوت التقدم للأمام.

على مقياس الاستقلالية، يُعتبر الروبوت الذي يمكنه أن يتصرف من تلقاء نفسه استجابةً لأجهزة الاستشعار الخاصة به مستقلًّا للغاية. والروبوت الذي لا يستطيع التصرف، ربما لأنه لا يحتوي على أي أجهزة استشعار، غير مستقل. من المهم أيضًا ملاحظة أن الاستقلالية والذكاء ليسا الشيء نفسه. فقد يكون الروبوت مستقلًّا لكن ليس ذكيًّا جدًّا، مثل المكنسة الروبوت.

(٥) ذكاء الروبوتات

كثيرًا ما يُطرَح عليَّ السؤال الآتي: «ما مدى ذكاء الروبوتات؟» وربما يكون ذلك بدافع الشعور بالقلق إزاء تمتُّع الروبوتات بالذكاء الشديد. الحق أنه سؤال تصعب الإجابة عنه على النحو الملائم. فإجراء مقارنات ذات مغزًى بين ذكاء روبوت معيَّن وحيوان معيَّن أمرٌ محفوف بالصعوبة، لأسباب أهمها أننا لا نملك فكرة واضحة عن كيفية مقارنة ذكاء معظم الحيوانات بعضها ببعض وبالبشر.

فبصورة عامة، نشعر أن التمساح أذكى من النملة، وأن القطة أذكى من التمساح، لكن هذه الفكرة خاطئة. فالذكاء ليس صفة واحدة قابلة للقياس (على غرار اختبار معدل الذكاء) يختلف مقدارها في الحيوانات المختلفة، أو حتى الروبوتات. لكن بغضِّ النظر عن هذا الاعتراض، ما تقييمنا لذكاء المكنسة الروبوت، على سبيل المثال؟ إذا كنت مُصرًّا على معرفة الجواب، فسأقول إنها تتمتع بمستوًى منخفض جدًّا من الذكاء.

فالمكنسة الروبوت تتمتع بعدد صغير من السلوكيات المبرمجة مسبقًا (الغريزية)، وهي ليست قادرة على أي نوع من التعلم (انظر المربع ١ للاطلاع على الوصف). إننا نعزو مثل هذه الخصائص إلى حيوانات بسيطة جدًّا. فهل المكنسة الروبوت بمثل ذكاء حيوان وحيد الخلية مثل الأميبا؟

عندما يصف علماء الروبوتات الروبوت بأنه ذكي، فإن ما يقصدونه هو «روبوت يتصرف، بدرجة محدودة، كما لو كان ذكيًّا». وللتعبير «كما لو» هنا أهمية كبيرة. فقلةٌ فقط من علماء الروبوتات هم مَن يدعون أن الروبوت ذكي حقًّا. وقد يزعمون أن الروبوت يستحق أن يُطلَق عليه لقب ذكي — بالمعنى الذي أشرت إليه — لأن الروبوت قادر على تحديد ما ينبغي فعله للتصرف بشكل مناسب استجابةً للمحفزات الخارجية.

وجهة نظري الخاصة هي أنه يمكن اعتبار الروبوت تجسيدًا لمحاكاة محدودة للذكاء، ويمكن اعتباره ذكيًّا في الوقت ذاته أيضًا. فعلى سبيل المقارنة، يمكن اعتبار الطائرة محاكاة

للطيران، لكن لا مجال للشك في أنها تطير بالفعل أيضًا. لذلك أعتقد أنه من الصعب القول إن الروبوت الذي يتصرف كما لو كان ذكيًّا — في النطاق المحدود للغاية لتلك السلوكيات — ليس ذكيًّا حقًّا. لكنني أقبل أن هذا الرأي قد يكون مثيرًا للجدل. فلا يزال السؤال عن الخصائص التي تشكل الذكاء سؤالًا صعبًا من الناحيتين العلمية والفلسفية.

لنفكر في ذكاء الروبوت بطريقة مختلفة. كان بإمكاني الإجابة عن السؤال «ما مدى ذكاء الروبوتات؟» كما يأتي: «إنها ذكية بقدر ما تحتاج لأداء المهمة التي صُممت من أجلها.» فالمكنسة الروبوت لا تحتاج إلى أن تكون ذكية جدًّا حتى تكون جيدة في تنظيف السجاد، وينطبق الشيء ذاته على العديد من الروبوتات. ولكن ماذا لو كانت الوظيفة التي نحتاج إلى روبوت لتنفيذها تتطلب ذكاءً أكثر بكثير؟ كيف يمكننا جعل الروبوتات أذكى، وما الحدود الحالية لذكاء الروبوتات؟

توجد طريقتان أساسيتان يمكننا من خلالهما جعل الروبوت يتصرف كما لو كان يتمتع بقدر أكبر من الذكاء:

(١) البرمجة المسبقة لعدد أكبر من السلوكيات (الغريزية).
(٢) تصميم الروبوت بحيث يمكنه التعلم؛ ومن ثَم يُطوِّر ذكاءه الخاص وينميه، ويمكن استخدام كلتا الطريقتين أو إحداهما.

هذه الطريقة الأولى جيدة، إذا كنا نعرف كل شيء عما يجب أن يفعله الروبوت وجميع المواقف التي سيتعين عليه الاستجابة لها خلال عمله. ونحن لا نستطيع القيام بذلك عادةً إلا إذا صمَّمنا كلًّا من الروبوت وبيئة التشغيل الخاصة به. فبهذه الطريقة يمكننا الحد من عدد الأشياء غير المتوقَّعة التي قد تحدث؛ ومن ثَم توقع كيفية استجابة الروبوت لكلٍّ من هذه الأحداث وبرمجته على هذا الأساس. تُعَد روبوتات المصانع مثالًا جيدًا على ذلك، فهي تعمل في بيئة مصمَّمة بعناية حيث يوجد العمل الذي يتعين عليها القيام به في نفس الموضع والاتجاه في كل مرة (لحام أجزاء من السيارة على سبيل المثال).

لكن ماذا لو أردنا أن يكون الروبوت قادرًا على العمل في بيئات غير مهيكَلة، أي في أي مكان لم يُصمم خصوصًا للروبوت؟ ومن هذا المنطلق، يمكن اعتبار أي بيئة خارجية أو داخلية غير مهيكلة. وحتى المكاتب، التي تبدو لنا على درجة عالية من الهيكلة، تمثل مشكلة للروبوتات بسبب الأشخاص الموجودين بها. إنَّ جعل الروبوتات ذكية وآمنة في البيئات البشرية من المشكلات الرئيسية التي يواجهها علماء الروبوتات، وهم لم يتوصلوا إلى حلها بعد.

في البيئات غير المهيكلة، يتعذر تطبيق الطريقة الأولى لذكاء الروبوتات؛ وذلك ببساطة لأنه من المستحيل توقُّع كل موقف محتمل قد يواجهه الروبوت، خاصةً إذا كان عليه التفاعل مع البشر. والحل الوحيد هو تصميم روبوت قادر على التعلم، إما من تجربته الخاصة أو من البشر أو من الروبوتات الأخرى؛ ومن ثَم التكيف وتطوير ذكائه الخاص: أي تنمية جميع سلوكياته ليكون قادرًا على الاستجابة بشكل مناسب على مزيد ومزيد من المواقف.

يقودنا هذا إلى موضوع تعلم الروبوتات، وهو شيء سأناقشه بمزيد من التفاصيل لاحقًا في هذا الكتاب. وسأكتفي الآن بالقول إنَّ تعلم الروبوتات أو «تعلم الآلة» عمومًا — وهو أحد فروع الذكاء الاصطناعي — قد ثبت أنه أصعب بكثير مما كان متوقَّعًا في الأيام الأولى للذكاء الاصطناعي. ومن ثَم، فعلى الرغم من وجود كثير من الأمثلة على روبوتات الأبحاث التي تتمتع بالقدرة على التعلم البسيط، مثل تعلم العثور على طريق للخروج من المتاهة، فإنَّ أيًّا منها لم يُظهر حتى الآن ما يمكن أن نُسميه بالذكاء العام لحل المشكلات. وهذه هي القدرة على التعلم إما فرديًّا (عن طريق التجربة والخطأ) أو اجتماعيًّا (من خلال المشاهدة والتعلم من معلم بشري أو روبوت آخر)، ثم تعميم تلك المعرفة المكتسَبة وتطبيقها على المواقف الجديدة. إنه نوع التعلم الذي يكتسبه أطفال البشر طبيعيًّا.

(٦) تاريخ مُوجَز جدًّا للروبوتات

على الرغم من أن كلمتَي «روبوت» و«علم الروبوتات»، والعلوم التي سارت على نهج الخيال، تعود بالتأكيد إلى القرن العشرين؛ فللروبوتات تاريخ طويل من الأفكار والاختراعات يسبق هذه الحقبة. ربما تكون أول إشارة معروفة لفكرة الأداة «الذكية» التي يمكن أن تحل محل العمالة البشري قد أتت من أرسطو، الذي كتب في عام ٣٢٠ قبل الميلاد أنه «إذا تمكَّنت كل أداة، عندما يُطلَب منها، أو حتى من تلقاء نفسها، من أداء العمل الذي يتناسب معها ... حينها لن يحتاج العمَّال ذوو الخبرة إلى متدربين، ولن يحتاج السادة إلى عبيد.»

تعود ممارسة تصميم الآلات الذاتية التشغيل إلى ما لا يقل عن ٢٠٠٠ عام. صمَّم هيرو السكندري عددًا من الآلات الذاتية التشغيل، ومنها عربة ذات ثلاث عجلات تعمل بالطاقة الذاتية، وذلك عام ٦٠ ميلاديًّا تقريبًا. كانت العربة تعمل عن طريق وزن يتدلى ساحبًا خيوطًا ملفوفةً حول محاورها، وقد اكتُشف مؤخرًا أنه يمكن برمجتها عن طريق وضع أوتاد في المحاور، بحيث يمكن عكس اتجاه لف الخيط على المحور. وبناءً على هذا، يمكن برمجة العربة على أن تنعطف وتتبع مسارًا محدَّدًا مسبقًا.

وتأتي أول إشارة إلى فكرة الإنسان الآلي من التراث الشعبي اليهودي، متمثِّلةً في شخصية جولم، وهو كائن حي في هيئة البشر مصنوع من مواد جامدة، عادةً من الطين، بُثَّت فيه الحياة عن طريق السحر. وتروي إحدى أكثر القصص شهرةً، على الرغم من أن أصولها الحقيقية مثيرة للجدل، كيف أنشأ الحاخام لوف من براج في القرن السادس عشر جولم للدفاع عن حي اليهود بالمدينة من الهجوم. تتمثل أحد الجوانب المثيرة جدًّا للاهتمام في هذا المخلوق الأسطوري في أنه يفهم الأوامر حرفيًّا؛ مما يتسبب في حدوث عواقب غير مقصودة تكون كارثية في بعض الأحيان. وهذه أيضًا من خصائص الروبوتات الحديثة، التي غالبًا ما نُذكَّر بها، نحن علماء الروبوتات، بشكل مؤلم.

تُعَد عربة ليوناردو دافنشي الذاتية الحركة واحدة من أكثر الآلات الذاتية التشغيل التي ظهرت في عصر النهضة إثارةً للاهتمام، والتي كانت سابقة لزمانها. لقد أثبتت الأبحاث الحديثة أن هذه العربة بمثابة آلة تعمل بالطاقة الذاتية وتتسم بدرجة بارزة من التطور والتعقيد. تعمل عربة ليوناردو عن طريق نوابض تشبه تلك الموجودة بالساعة، لكن أبرز ما فيها هو نظام الكامات القابلة للاستبدال التي تتحكم في كلٍّ من التوجيه والسرعة. يسمح هذا النظام ببرمجة العربة لتتبع مسارًا محدَّدًا مسبقًا، مع إمكانية الانطلاق والتوقف والانعطاف حسب الحاجة. يمكن أيضًا برمجة الروبوت لإحداث تأثير خاص في وقت محدَّد مسبقًا، مثل فتح باب على منحوتة مثبتة على العربة. من الممكن أيضًا أن يُنسب إلى ليوناردو الفضل في تصميم أول إنسان آلي كامل، قرابة عام ١٤٩٥، عندما صمم الفارس الروبوت. واستنادًا إلى مبادئ الميكانيكا الحيوية التي توصل إليها أبحاثه التشريحية، صمَّم ليوناردو لفارسه ذراعين ورأسًا وفكًّا تتحرك بكابلات.

خلال القرن الثامن عشر، بلغت الآلات الميكانيكية الذاتية التشغيل درجةً عالية من التطور (وكذلك التزييف). ربما يكون المثال الأكثر شهرةً هو البطة الميكانيكية التي ابتكرها المخترِع الفرنسي دي فوكانسون عام ١٧٣٩، والتي اشتهرت بقضاء حاجتها بعد «أكل» الحبوب. لكن ذلك لم يكن سوى خدعة، فما كانت البطة تفرزه في الواقع هو خلطة مجهَّزة مسبقًا من فتات الخبز المصبوغة باللون الأخضر. (فالهضم الاصطناعي الحقيقي للروبوتات لم يظهر إلا بعد ٢٧٠ سنة، كما أذكر في الفصل الثالث.) ومن وجهة نظري، يتجسد المثال الأهم لدي فوكانسون في آلة لعب الفلوت التي تتخذ شكل إنسان، والتي تتميز بتطور آلياتها ومحاكاتها الحيوية للتحكم في تدفق الهواء، عبر حركات لسان الروبوت وشفتَيه، اللازمة لعزف الفلوت بنجاح.

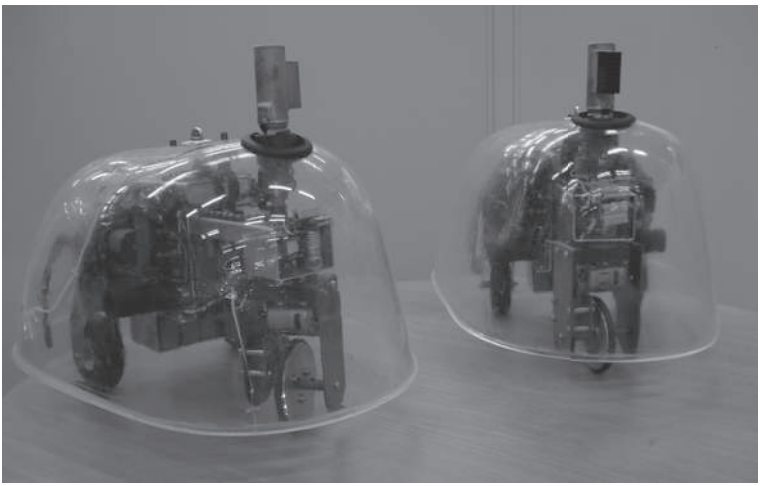
يعتمد موضوع هذا الكتاب، علم الروبوتات الحديث، على العديد من التقنيات الرئيسية، ومنها المحرِّك الكهربائي الذي يُزوِّد الروبوتات بالقدرة على الحركة، والأجهزة الإلكترونية التي تُوفِّر وسائل أتمتة الروبوتات والتحكم فيها. لكن الأفكار الجديدة كانت ضرورية أيضًا، وفي منتصف القرن العشرين، وضعت مجموعة رائعة من الرجال أسس علم الروبوتات الحديث فيما كان يُسمى في ذلك الوقت (ولا يزال أحيانًا) بالسبرانية.

وكان من بين الأعضاء البارزين العالمان البريطانيان آلان تورنج ودبليو روس آشبي، وفي الولايات المتحدة نوربرت وينر ووارن ماكولوتش. وكان من بين تلك المجموعة عالم الفسيولوجيا العصبية اللامع دبليو جراي والتر. يحتل والتر مكانةً خاصة في تاريخ علم الروبوتات الحديث بسبب سلاحفه «الروبوتية»، التي يُنظَر إليها الآن على نطاق واسع على أنها أول روبوتات إلكترونية متحركة مستقلة (انظر الشكل ١-٣).

طوَّر والتر سلاحفه (التي سُميت بهذا الاسم لأنها «علمتنا» مثلما فعلت سلحفاة لويس كارول) لتوضيح أفكاره عن وظائف الدماغ. لقد كان مقتنعًا بأن أهمية الوصلات الموجودة داخل الدماغ وعددها في ظهور الذكاء أكبر كثيرًا من أهمية عدد خلايا الدماغ. وقد صمم نظام التحكم في الروبوتات مستخدِمًا ما يصفه بأنه: «نظام عصبي بسيط مكوَّن من خليتين» لإثبات أن نظامًا بسيطًا جدًّا كهذا يمكنه أن يتمتع بسلوكيات غنية. وكانت «الخليتان» عبارة عن أنابيب مفرغة (مكافئ الترانزستور في الأربعينيات)، ومن خلال ربط الخليتين وأجهزة استشعار الروبوت ومحركاته ببراعة، أظهرت الروبوتات أربعة سلوكيات مختلفة.

في الوضع الافتراضي، تدور العجلة الأمامية للروبوت التي توفر التوجيه والجر (مثل دراجة الطفل الثلاثية العجلات) باستمرار؛ مما يُوفِّر للروبوت حركة دائرية مميزة؛ وهذا هو سلوك «الاستكشاف». وثَمة خلية كهروضوئية مُركَّبة في الجزء العلوي من عجلة التوجيه/الدفع تجعل الروبوت حسَّاسًا للضوء؛ لذلك ينجذب إلى مصدر الضوء القوي الموجود على مسافة ما، وينفر من مصدر الضوء عندما يكون قريبًا جدًّا. أما السلوك الرابع فهو تجنب العوائق: حيث يتمتع الروبوت بقشرة مصنوعة من البرسبيكس مزوَّدة بمستشعر للصدمات، وحين يستثيره محفزٌ ما، يغير الروبوت حركته كي يتفادى الاصطدام بالعائق.

لقد أثبتت روبوتات والتر أفكارًا في مجال علم الروبوتات أُعيد اكتشافها في الثمانينيات بعدما كانت في طي النسيان. وبالرغم من أن سلاحف والتر غير مبرمجة مسبقًا ولا يتم



شكل ١-٣: نسخ طبق الأصل من سلاحف جراي والتر الروبوتية

التحكم فيها عن بُعد، فهي تتصرف بطريقة معقَّدة وغير متوقَّعة ترتبط ببيئة تشغيل الروبوت بقدر ما ترتبط بالروبوت ذاته. وفي سلسلة رائعة من التجارب، ثبَّت والتر شموعًا على السلحفاتَين، المُسمَّيَين بإلسي وإلمر، ثم التقط حركاتهما بكاميرا تسمح بدخول كمية كبيرة من الضوء لفترة طويلة. وأظهرت كلٌّ من إلسي وإلمر سلوكيات غير متوقَّعة. على سبيل المثال، عند وضعهما في غرفة مظلمة من دون أي مصدر ضوء آخر، كانت إلسي تلاحظ إلمر، والعكس صحيح، وكان الروبوتان يقتربان أحدهما من الآخر، ثم ينخرطان في نوع من «الرقصات».

تنبَّأت هذه التجارب بأفكار من علم الروبوتات القائم على السلوك، والتي أذكرها في الفصل الثالث، وأسراب الروبوتات، التي أعرضها في الفصل الخامس. ومن ناحية أخرى، حافظت سلاحف جراي والتر الروبوتية على تقليد ترسَّخ بالفعل في آلات القرن التاسع عشر الذاتية التشغيل، وهو تجسيد الآلات لنماذج بسيطة من الحياة، للتثقيف والترفيه على حدٍّ سواء.

الفصل الثاني

ما تفعله الروبوتات الآن

(١) روبوتات خطوط التجميع: روبوتات لصنع الأشياء

تُعَد روبوتات خطوط التجميع هي روبوتات الأعمال الشاقَّة: فهي الروبوتات غير الجذَّابة المشغولة بالعمل في المصانع منذ عقود. والمصطلح الذي يُطلَق عادةً على هذه الروبوتات هو أذرع الروبوتات، أو من الناحية الفنية، الأجهزة الميكانيكية المتعددة المحاور للتحكم في المواد. ويُوضِّح الشكل ٢-١ عدة أمثلة لأذرع الروبوتات الصناعية. يتكون كلٌّ منها من قاعدة مثبَّتة على الأرض، ومجموعة من المقاطع التي تتصل كلٌّ منها بالأخرى عن طريق مفصل ومحرك. في نهاية المقطع الأخير يوجد مفصل رسغ يسمح عادةً بتوصيل أيٍّ من الأدوات العديدة التي يؤدي كلٌّ منها غرضًا محددًا. تُعرف هذه المفاصل باسم المستجيبات الطرفية.

هذه المستجيبات الطرفية هي ما يقوم بعمل الروبوت. تسمح محركات المفاصل بتحرك المفاصل الفردية في محاور مختلفة؛ مما يعني أن مجموعة من الحركات عبر المحاور المتعددة ستسمح بتمركز المستجيبات الطرفية في أي زاوية أو مكان يمكن أن يصل إليه الروبوت.

إنَّ نقطة القوة العظيمة لأذرع الروبوتات الصناعية في واقع الأمر هي قوة تحملها مع دقتها العالية. وعادةً ما يمكن ضبط موضع المستجيب الطرفي مرارًا بدقة تفوق ١ ملِّيمتر، وهو أمر رائع؛ نظرًا لأن الروبوت قد يزن عدة مئات من الكيلوجرامات. غالبًا ما تُبرمَج أذرع روبوت خطوط التجميع على تنفيذ سلسلة ثابتة من الحركات مرارًا وتكرارًا، على سبيل المثال القيام باللحام النقطي لألواح هيكل السيارة، أو طلاء السيارة بالكامل بالرش. لذلك فإن هذه الروبوتات ليست ذكية. واقع الأمر أنها لا تحتوي في المعتاد على أي أجهزة استشعار خارجية. (غير أنها تُزوَّد عادةً بأجهزة استشعار داخلية لقياس زوايا

شكل ٢-١: روبوتات خطوط التجميع الصناعية

كل مفصل.) وبناءً على هذا، قد لا يتمكن روبوت الطلاء بالرش من استشعار ما إذا كانت هناك سيارة لطلائها أم لا. وبهذا، فهو يعتمد على السيارة، أو على العمل بصفة عامة، في أن يتمركز في المكان المناسب وفي الوقت المناسب، وأن يكون جاهزًا لأن يبدأ الروبوت دورة عمله. ولهذا فعندما نرى خط تجميع به أذرع روبوت متعددة موضوعة على جانبَي الخط، ينبغي أن نفهم أن الروبوتات جزء من نظام تصنيع آلي متكامل، حيث يجب برمجة كل روبوت والخط ذاته بعناية لتنسيق العملية برُمَّتها وتنظيم الحركة.

من الخصائص المهمة لروبوتات خطوط التجميع أنها تتطلب تصميم بيئة العمل من أجلها ومن حولها؛ أي تصميم بيئة مهيكلة. وهي تحتاج أيضًا إلى أن تكون بيئة

العمل هذه بالطبع قابلة للتنبؤ بها وقابلة للتكرار. على النقيض من هذا تقع البيئات البشرية التي تكون عادةً (من وجهة نظر الروبوت) غير مهيكلة ولا يمكن التنبؤ بها. ولهذا السبب، إضافةً إلى حقيقة أن روبوتات خطوط التجميع تُشكِّل خطرًا على البشر؛ لأنها قوية وغير قادرة على استشعار وجود البشر، يحتاج البشر إلى البقاء على مسافة آمنة. وعلى الرغم من كونها تقنيةً ناجحة للغاية، فإن روبوتات خطوط التجميع هي الموجة الأولى من الروبوتات: الروبوتات غير المصمَّمة للتفاعل مع البشر.

(١-١) كيفية برمجة ذراع الروبوت

تخيَّل السهولة التي نُمسِك بها أنا وأنت كوبًا من القهوة ونرفعه إلى شفاهنا. ذلك شيء يبدو أنه لا يتطلب جهدًا واعيًا على الإطلاق، باستثناء الحد الأدنى من الدافع لاحتساء رشفة من القهوة. ومع ذلك، غير أننا حين نفكك ما تنطوي عليه هذه العملية من إجراءات، نرى أن ما يحدث بالفعل بعيدٌ كل البعد عن البساطة. ففي البداية، تمدُّ يدك إلى الكوب: وهو إجراء يتضمن بالطبع تحريك مفصلَي الكتف والمرفق. لكن هذه العملية تنطوي على الإحساس أيضًا؛ لأن هذه الحركات تحتاج إلى أن تسترشد بمعرفتك بمكان الكأس؛ أؤكد مرةً أخرى على أنَّ هذه العملية لا شعورية، وأنت لا تحتاج حتى إلى النظر مباشرةً إلى الكأس لكي تنجح في التقاطه. وفور أن تصل يدك إلى مقبض الكوب، تخضع مفاصل أصابعك لمجموعة معقَّدة من الحركات حتى تتمكن من الإمساك بالمقبض. وحتى إذا كنت لم تصادف هذا النوع المحدَّد من المقابض قبل ذلك، فسيظل بإمكانك تكييف أصابعك تلقائيًّا، ودون بذل جهد واعٍ، لتتناسب مع هذا الشكل.

بعد ذلك تبدأ في رفع الكوب. في هذه المرحلة، يحدث شيء آخر رائع: تشعر تلقائيًّا (ومرةً أخرى دون إدراك واعٍ) بوزن الكوب والسائل الموجود فيه، وتستعمل القدر المناسب من القوة في مفاصل الكتف والكوع والرسغ. ذلك أنك إذا استعملت قدرًا قليلًا من القوة، فلن ترفع الكأس على الإطلاق، وإذا استعملت قدرًا كبيرًا، فستنسكب القهوة. وعندما تضع الكوب أمام شفتَيك، تعدل رسغك بسلاسة بحيث يظل الكوب — والقهوة الموجودة فيه — مستويًا مع انثناء كوعك. وهذا الإجراء، مرةً أخرى، دون تفكير واعٍ، يسترشد بعينيك وردِّ فعل ذراعك وضغط أصابعك. وأخيرًا، عندما يلامس الكوب شفتَيك، ربما بحذر لأنك تشعر بأن القهوة ساخنة، فإن تحديد موضع الكوب بدقة وإمالته بعناية للشرب سيعتمد أيضًا على حاسة اللمس في شفتَيك.

يُظهر هذا المثال التوضيحي لعمل بشري يبدو عاديًّا للغاية أن هذا العمل يستلزم قدرًا كبيرًا من التنسيق بين الاستشعار والتحكم في مفاصل عديدة. لقد تعلمنا «البرمجة» العصبية التي تمنحنا هذه المهارة في مرحلة مبكرة للغاية من النمو. لكن الأذرع الروبوتية من النوع الذي نراه في خطوط التجميع، ليست لديها هذه العملية لتعلم مهارة جديدة.

ما تحتاج إليه أذرع الروبوت هو إما أن تكون مبرمَجة بدقة شديدة، بحيث تُصمَّم الحركة الدقيقة المطلوبة لكل مفصل وتُشفَّر في مجموعة من التعليمات لذراع الروبوت، أو أن «يعلمها» الإنسان باستخدام لوحة تحكم لتحريك المستجيب الطرفي (اليد) إلى المواضع المطلوبة في بيئة عمل الروبوت، وهو ما يحدث في كثير من الأحيان (وبمزيد من السهولة). بعد ذلك يحفظ الروبوت مجموعة حركات المفاصل بحيث يمكن إعادة تشغيلها (مرارًا وتكرارًا). يتحكم المشغِّل البشري الذي يعلِّم الروبوت في المسار، أي الطريق الذي يتبعه المستجيب الطرفي لذراع الروبوت في أثناء تحرُّكه عبر بيئة عمله الثلاثية الأبعاد، وتعمل مجموعة من المعادلات الرياضية تُسمى «علم الكينماتيكا العكسية» على تحويل المسار إلى مجموعة من الحركات الفردية للمفصل.

باستخدام هذا النهج، من السهل نسبيًّا تعليم ذراع الروبوت التقاط جسم ما ونقله بسلاسة إلى مكان آخر في بيئة عمله مع الحفاظ عليه مستويًا (مثل كوب القهوة في مثالنا البشري). بالرغم من ذلك، فعلى عكس مثالنا، لا تستطيع معظم أذرع الروبوتات الحالية استشعار وزن الجسم الذي تحمله والتكيف تلقائيًّا وفقًا لذلك. ذلك أنها مصمَّمة ببساطة بمفاصل صلبة ومحركات قوية بما فيه الكفاية لأن تسمح لها برفع أي جسم ونقله ووضعه بالدقة نفسها بصرف النظر عن وزنه، ما دام في ضمن الحدود التي يسمح بها تصميم الروبوت.

وبالمثل أيضًا، فإن صلابة الحركة ودقتها، في ظل التحكم المبرمج، تعني أن الذراع الروبوتي يمكن أن يحافظ على الجسم مستويًا دون الحاجة إلى العمليات التكيفية من الاستشعار المستمر والتحكم، والتي يحتاج البشر إليها للحفاظ على استواء الجسم في أثناء تحريكه. فصلابة مفاصل الروبوت هي التي تجعل من السهل نسبيًّا برمجتها والتحكم فيها بدقة وبشكل متكرر. وفي هذا الصدد، فإنَّ الأذرع الروبوتية التقليدية مختلفةٌ أشد الاختلاف عن أذرع البشر أو أطراف الحيوانات.

تُعَد الأذرع الروبوتية والمقابض تقنيةً أساسية في علم الروبوتات. إنَّ أهميتها الشديدة لا تقتصر على استخدامها في روبوتات خطوط التجميع الصناعية، بل أصبحت

«عنصرًا» أساسيًّا في العديد من مجالات علم الروبوتات. توجد تنويعات مختلفة من الأذرع الروبوتية متصلة بمنصات متحركة مثل المركبات الغواصة المشغَّلة عن بُعد أو روبوتات إبطال مفعول القنابل أو مركبات المريخ الجوَّالة. وتُعتبر الأذرع الروبوتية، التي تتمتع بدرجات شديدة التباين من التطور، من السمات الأساسية في الروبوتات التي تشبه البشر، وسأتطرق لموضوع الأذرع الروبوتية التي تشبه البشر، بما في ذلك الأذرع الروبوتية المطواعة، في الفصل الرابع.

(٢) روبوتات نقل البضائع: الروبوتات التي تجلب البضائع وتحملها

عند شراء شيء ما من بائع عبر الإنترنت، ثَمة احتمال كبير في أنَّ أحد الروبوتات هو ما يجمع الطلب من رفوف المخزن، ثم ينقله إلى نقطة مركزية حيث يضعه عاملو التعبئة في صندوق جاهز للإرسال. وعلى عكس روبوتات خطوط التجميع، فإن روبوتات المخازن متنقلة. فهي روبوتات لنقل البضائع؛ أي إنها مصمَّمة أساسًا لجلب الأشياء وحملها. بالرغم من ذلك، تشترك روبوتات المخازن مع روبوتات خطوط التجميع في شيء واحد: أنها تعمل في بيئات مهيكَلة للغاية حيث لا يتدخل البشر بشكل عام. وتعمل بعض المخازن دون إضاءة لأن الروبوتات لا تحتاج إلى ضوء، ولا يحتاج البشر إلى الذهاب إلى جزء التخزين الرئيسي في المخزن على الإطلاق (إلا إذا حدث خطأ ما بالطبع). وعادةً ما تتحرك روبوتات المخازن على طول المسارات المحدَّدة مسبقًا عبر المخزن.

بالرغم من ذلك، فعلى غرار روبوتات خطوط التجميع، تُعَد روبوتات نقل البضائع آلات متطورة للغاية. ومثلما هو الحال مع روبوتات خطوط التجميع، من الخطأ الحكم على روبوت واحد بمعزل عن الآخرين. فغالبًا ما تعمل روبوتات نقل البضائع في مجموعات تُسمى الأنظمة المتعددة الروبوتات، والتي تُشكِّل بدورها الجزء المرئي من نظام متكامل شديد التعقيد. وسوف أذكر المزيد عن الأنظمة المتعددة الروبوتات في الفصل الخامس.

تنتمي روبوتات نقل البضائع في المخازن أو المصانع إلى فئة مهمة من الروبوتات تُسمى المركبات الموجَّهة آليًّا. والمركبة الموجَّهة آليًّا هي روبوت متحرك قادر على التنقل بشكل مستقل من نقطة إلى أخرى، وغالبًا ما يكون ذلك عن طريق اتباع سلك مدفون أو علامات على الأرض. لا بد أن تكون المركبة الموجَّهة آليًّا الخاصة بنقل البضائع قادرة على حمل الحمولة أو سحبها، وربما رفعها ووضعها في المكان المخصَّص لها، وتنفيذ هذه المهام كلها من تلقاء نفسها. وخير مثال على ذلك هو الرافعة الشوكية الموجَّهة آليًّا (رافعة

شوكية دون سائق): ولا بد أن تكون قادرة على استشعار العقبات في طريقها، بما في ذلك الأشخاص، والتوقف بأمان. وعادةً ما تكون المركبة الموجَّهة آليًّا مركبة كهربائية تعمل بالبطاريات؛ ولذا يجب أن تكون قادرة أيضًا على استشعار مستوى شحن البطارية الخاصة بها وتحديد وقت التوقف عن العمل والتوجه إلى محطة إعادة الشحن.

يمكننا إذَن أن نرى أن المركبة الموجهة آليًّا لنقل البضائع تحتاج إلى ثلاثة أنواع على الأقل من أجهزة الاستشعار: نوع لاكتشاف علامات التوجيه، ونوع لاكتشاف العوائق، ونوع لاستشعار مستوى البطارية الخاصة بها. وهي تحتاج أيضًا إلى التواصل، لا سلكيًّا، مع نظام المخزن أو المصنع الذي يتحكم في المركبات الموجهة آليًّا وينسق عملياتها، وإذا كان لا بد من تحميل المركبة الموجهة آليًّا أو تفريغها يدويًّا، فستحتاج إلى واجهة بسيطة للتفاعل بين الإنسان والروبوت حتى يتمكن المشغل البشري من إخبار المركبة الموجهة آليًّا عند الانتهاء من التحميل أو التفريغ. ينتج عن كل هذه المتطلبات روبوت متنقل «أذكى» بكثير من نظيره الثابت؛ أي روبوت خطوط التجميع. يجب أيضًا أن يكون هذا الروبوت قويًّا وموثوقًا به وآمنًا للغاية.

لقد استُخدمت المركبات الموجهة آليًّا لعقود عديدة، وثَمة جيل جديد منها صار يُستخدم في بيئات بشرية للغاية. من أمثلة ذلك، الروبوت «تَج» من شركة أيثون: وهو روبوت لنقل المعدات في المستشفيات، ويظهر في الشكل ٢-٢. في وقت كتابة هذا الكتاب، يوجد أكثر من مائة روبوت من هذه الروبوتات تُستخدم في مستشفيات الولايات المتحدة، عادةً لجلب الإمدادات الطبية، بما في ذلك الدم أو الأدوية، أو تسليم عينات للتحليل. ويتميز الروبوت بتصميم مثير للاهتمام: فهو يتألف من حاوية على عجلات، مزوَّدة بأقسام أو أدراج مصمَّمة لحمل أي شيء، يجرُّها روبوت «سحب» صغير (ومن هنا جاءت التسمية «تَج» التي تعني سحبًا باللغة الإنجليزية).

على عكس نظائره الصناعية، لا يتطلب الروبوت تَج أسلاكًا مدفونة أو علامات على الأرض للتنقل. فكل روبوت مبرمَج مسبقًا بخريطة إلكترونية ثلاثية الأبعاد للمستشفى، مع تمييزها بمواقع رئيسية مثل الصيدلية، ومختبر علم الأمراض، ومراكز التمريض، والأبواب، والمصاعد، والأهم من ذلك محطة إعادة شحن الروبوت، التي تُعتبر الموقع «الرئيسي».

يتنقل الروبوت عن طريق مطابقة ما «يراه» من خلال أجهزة تحديد المدى بالليزر الخاصة به، مع ما يتوقع رؤيته من موقعه الحالي واتجاهه وفقًا لخريطته الداخلية. تخيل أجهزة تحديد المدى بالليزر على أنها أشعة ضوء مرسَلة لقياس المسافة بين الروبوت وكل

شكل ٢-٢: الروبوت تَج من شركة أيثون لنقل المعدات في المستشفيات

جسم أمامه، فالروبوت في الواقع يتمتع بـ «رؤية» ثلاثية الأبعاد؛ أي إنه يرى قياسات العمق. وبذلك يكون الروبوت قادرًا على تتبع موقعه في خريطته الداخلية. إذا استشعر الروبوت أن الطريق أمامه خالٍ، فسيشقُّ طريقه إلى وجهته بشكل مستقل؛ وإذا استشعر، على سبيل المثال، أنه وصل إلى نهاية ممر يتقاطع مع آخر، فسيراجع الروبوت خريطته الداخلية ليُقرِّر ما إذا كان سيتجه إلى اليسار أو اليمين.

تحتاج المستشفى بالطبع إلى بعض البنية التحتية الخاصة لدعم روبوتات النقل: فيجب أن تكون الأبواب والمصاعد مزوَّدة بأجهزة تحكم عن بُعد تسمح للروبوت بـ «طلب» فتح الباب، أو ركوب المصعد وتسجيل الدور الذي يريد الذهاب إليه. ولا بد بالطبع من

وجود شبكة لا سلكية (توجد بالمستشفى على الأرجح في أي حال) حتى يتمكن العاملون بالمستشفى من طلب الروبوت.

على عكس المركبات الموجهة آليًّا في المخازن، لا بد للروبوت تَج من التفاعل مع أشخاص؛ إذ يجب أن يعمل بأمان في واحدة من أكثر البيئات البشرية طلبًا لبذل المجهود. وتتمثل أولى ميزات الأمان الأساسية في أن تَج يتحرك ببطء إلى حد ما، ويُصدِر في أثناء تحركه صفيرًا مسموعًا للتنبيه. والسمة الثانية أن تَج يستشعر الاصطدامات المحتمَلة مع الأشخاص أو الأشياء، وحينها يتوقف، وهو لا يبدأ بالتحرك مرةً أخرى إلا عندما يكون الطريق خاليًا. أما التفاعل بين الإنسان والروبوت فهو بسيط، لكنه فعَّال. يمكن لموظفي المستشفى طلب إجراء عمليات الاستلام أو التسليم عبر شبكة الواي فاي، وعندما يصل تَج إلى وجهته، يقدم طلبًا شفهيًّا من خلال «النطق» بعبارة مؤلفة، ليُوضِّح للمستخدِم البشري أنه قد أتى إما لاستلام عنصر أو تسليمه. لا يحتوي تَج على خاصية الإدخال الصوتي، بل زرَّين كبيرين فحسب: (pause (توقف مؤقت) وgo (انطلاق))؛ ويضغط المستخدم على الزر المناسب بعد التحميل أو التفريغ ليرسل الروبوت في طريقه. وبين عمليات التسليم، يشقُّ تَج طريقه عائدًا إلى محطة إعادة الشحن الخاصة به ليكون جاهزًا للعمل في المرة التالية التي يُطلَب فيها.

(٣) الروبوتات المشغَّلة عن بُعد: إطلاع الإنسان على المستجدات

في السنوات الأخيرة، برزت الروبوتات المشغَّلة عن بُعد (وإن لم تكن تحمل هذا الاسم بالضرورة)، في عدد من الاستخدامات المهمة. فأصبحت المركبات الغواصة المشغَّلة عن بُعد تقنيةً معتادة في عمليات استكشاف أعماق البحار والإنقاذ والصيانة. وفي مجال الفضاء العسكري، اكتسبت الطائرات المشغلة عن بعد بدون طيار أهميةً كبيرة في عمليات الاستطلاع الجوي منذ عام ١٩٩٠. وحقَّقت رحلات استكشاف الكواكب نجاحًا ملحوظًا مع مسبارَي الفضاء السحيق المشغَّلَين عن بُعدٍ «بايونير وفوياجر»، ومؤخرًا مع مركبتَي المريخ الجوالتين «سبيريت وأبورتيونيتي». إضافةً إلى ذلك، صارت الأجهزة الروبوتية المشغَّلة عن بُعد تحظى بقبول الجراحين، وتُعتبر بالفعل أدوات رئيسية لبعض العمليات الجراحية. وسأذكر أمثلة من هذه التطبيقات الواقعية، لكن دعونا أولًا نعرِّف الروبوتات المشغَّلة عن بُعد.

تصف الروبوتات المشغَّلة عن بُعدٍ فئة الروبوتات التي يشغلها البشر عن بُعد. ومن ثَم، فإن الروبوتات المشغَّلة عن بُعد تتناقض مع الروبوتات المستقلة التي لا تتطلب أي تدخل بشري لإكمال المهمة المطلوبة منها. غير أنَّ الفرق بين الروبوتات المستقلة والروبوتات المشغَّلة عن بُعد غيرُ واضح تمامًا؛ لأن بعض الروبوتات المشغَّلة عن بُعد تتمتع بدرجة كبيرة من الاستقلالية المحلية. وقد يقبل الروبوت، على سبيل المثال، أوامر مثل «التحرك للأمام بمقدار ٣٠سم»، ويتحكم ذاتيًّا في محركاته وعجلاته لتنفيذ هذا الأمر، دون الحاجة إلى المُشغِّل البشري في عمليات التحكم إن كانت على هذه الدرجة من انخفاض المستوى.

تشترك الغالبية العظمى من الروبوتات المشغَّلة عن بُعد في جميع الخصائص الموضَّحة في الفصل الأول. وغالبًا ما تكون مجهَّزة بمجموعة غنية من أجهزة الاستشعار، بما في ذلك كاميرات، ومجموعة من المشغلات المعقدة للتنقل والتحكم في الأجسام. بالرغم من ذلك، يجدر بنا عند مناقشة الروبوتات المشغلة عن بُعدٍ أن نراعي النظام بأكمله، بما في ذلك المشغل البشري، وليس الروبوت فقط.

يتكون نظام الروبوت المشغَّل عن بُعد من عناصر رئيسية ثلاثة: واجهة المشغِّل، وحلقة التواصل، والروبوت نفسه. لنتناول الآن هذه العناصر.

واجهة المشغل: تتألف بشكل عام من شاشة عرض واحدة أو أكثر لعرض فيديوهات كاميرا (كاميرات) الروبوت وغيرها من المعلومات عن حالة الروبوت أو أجهزة الاستشعار. إضافةً إلى ذلك، ستتطلب الواجهة وجود أجهزة إدخال للسماح للمشغل بإدخال الأوامر (عبر لوحة المفاتيح)، أو التحكم يدويًّا في الروبوت (عبر عصا التحكم، على سبيل المثال).

حلقة التواصل: قد يُستخدم الاتصال السلكي في حالة الروبوتات الثابتة المشغَّلة عن بُعد، أو الاتصال اللاسلكي في حالة الروبوتات المتنقلة. في كلتا الحالتين، يجب أن تكون حلقة التواصل ثنائية الاتجاه بحيث يمكن نقل الأوامر من واجهة المشغل إلى الروبوت، ويمكن في الوقت نفسه نقل معلومات عن الرؤية والمستشعر والحالة من الروبوت إلى المشغل. وغالبًا ما تتطلب قناة التواصل سعةً عالية لنقل الفيديو في أثناء حدوثه من الروبوت إلى المشغل.

الروبوت: يختلف تصميم الروبوت اختلافًا كبيرًا حسب الاستخدامات المختلفة وبيئات التشغيل. لكن سواء كان الروبوت يسير على مسارات أو يطير أو يسبح، فإنه سيحتاج

دائمًا إلى عدد من الأنظمة الفرعية المشتركة. يحتاج الروبوت إلى أجهزة إلكترونية للتواصل والمعالجة الحوسبية والتحكم. ويحتاج إلى برنامج لتفسير الأوامر من واجهة المشغِّل وترجمتها إلى إشارات للمحرِّكات أو المشغِّلات. وسيحتاج البرنامج إلى متابعة «الإشارات الحيوية» للروبوت، بما في ذلك مستويات شحن البطارية، وإرسال معلومات الحالة إلى المشغل إضافةً إلى بيانات من كاميرات الروبوت وأجهزة الاستشعار الأخرى.

أبرز ما تتَّسم به الأنظمة المشغَّلة عن بُعد هي أن المشغِّل البشري جزء لا يتجزأ من حلقة التحكم الكلية. يُنقَل الفيديو من كاميرا الروبوت، عبر حلقة التواصل، إلى المشغل البشري. ويُفسِّر المشغِّل السيناريو المعروض ويُدخِل أوامر التحكم المناسبة التي تُرسَل، عبر حلقة التواصل، إلى الروبوت. بعد ذلك، يعمل الروبوت (أو يتحرك) في بيئته وفقًا لمتطلبات التحكم، وتنعكس نتيجة هذه الإجراءات للمشغِّل في بيانات الفيديو المحدثة. وبهذا، تُغلَق حلقة التحكم.

أي شخص حاوَل تشغيل روبوت عن بُعد بينما ينظر إلى شاشة تُظهر ما يراه الروبوت عبر الكاميرا المثبَّتة عليه يعرف مدى صعوبة ذلك الأمر؛ ولهذا فإن التصميم الجيد لواجهة المشغِّل مهم جدًّا لنجاح أنظمة الروبوت المشغَّلة عن بُعد. ومن مشكلات التصميم، على سبيل المثال، كيفية تزويد المشغل البشري بتجربة غامرة من بيانات استشعار الروبوت (أي أن يشعر كما لو كان موجودًا مع الروبوت). وتتمثل إحدى طرق تحسين الاستشعار في إتاحة خاصية خلال اللمس عن بُعد؛ أي السماح للمشغل البشري بالشعور بما تلمسه مستشعرات اللمس في الروبوت. إنَّ نظام الروبوتات المشغلة عن بُعد إذا كان مُتقَن التصميم، سيُوسِّع نطاق حواس البشر وأدواتهم، ليسمح لهم بالاستكشاف أو الفحص أو التدخل في بيئات شديدة الخطورة بالنسبة للبشر أو يتعذر وصولهم إليها.

من ناحية التصميم، تكمن أهم ميزات الروبوتات المشغلة عن بعد في أن وجود الإنسان في الحلقة يوفر «ذكاء» الروبوت. وهذا يوفر حلًّا لواحدة من أصعب المشكلات في مجال علم الروبوتات، وهي تصميم الذكاء الاصطناعي للروبوت، فليس من المفاجئ إذَن أن العديد من الروبوتات الحالية من الروبوتات المشغَّلة عن بُعد. ولا ينبغي أن تخدعنا حقيقة أن الروبوتات المشغلة عن بُعد تُخفِّف من وطأة مشكلة تصميم الذكاء الاصطناعي فنظن خاطئين أن الروبوتات المشغلة عن بُعد ليست معقَّدة، فهي كذلك.

لنُلقِ نظرةً الآن على بعض الأنواع التمثيلية للروبوتات المشغلة عن بُعد.

(٣-١) الروبوتات الغواصة: المركبات المشغَّلة عن بُعد

تُعَد المركبات المشغَّلة عن بُعد هي روبوتات الأعمال الشاقة في قطاع التنقيب عن النفط وحفر الآبار في البحار؛ وهي أيضًا روبوتات أساسية لاستكشاف أعماق البحار وعلومها. اشتهرت مركبات العلوم المشغلة عن بعد بأداء دور رئيسي في استكشاف الحياة النباتية والحيوانية الغنية حول الفوهات الحرارية المائية التي ينبثق منها ماء ساخن في أعماق البحار. إنها في الأساس غواصات آلية يجري التحكم فيها عن بعد، وغالبًا ما يكون بها أذرع روبوتية مزوَّدة بمقابض أو أجهزة ميكانيكية للتحكم في المواد بحيث يمكن لمشغل هذه المركبات عن بعدٍ الاضطلاع بعمليات الصيانة أو الإصلاح، أو جمع العينات في حالة مركبات العلوم المشغَّلة عن بعد. وغالبًا ما تُوصَّل المركبات المشغلة عن بعد بالسفينة الأم عبر كابل، ينقل إشارات الطاقة والتحكم إلى المركبة المشغلة عن بعد، وينقل البيانات الواردة من كاميرا الفيديو والأجهزة الأخرى من المركبة المشغلة عن بعد إلى المشغل البشري على متن السفينة.

(٣-٢) الروبوتات العسكرية

غالبًا ما يُقال إن الروبوتات هي الأنسب للمهام المملة أو القذرة أو الخطيرة. ومن أهم أنواع الروبوتات في فئة المهام الخطيرة روبوتات إبطال مفعول القنابل. كان الجيش البريطاني رائدًا في السبعينيات باختراع ما يُسمى «عربة اليد»، وهي مركبات تُشغَّل عن بُعد تتمثل مهمتها الأساسية في السماح لخبراء المفرقعات بتفتيش المركبات أو المباني المشتبَه باحتوائها على قنابل مزروعة بداخلها دون تعريض أنفسهم للخطر.

روبوتات إبطال مفعول القنابل هي في الأساس روبوتات متنقلة متينة يجري التحكم فيها عبر جهاز لا سلكي، تسير في المعتاد على مسارات وتُزوَّد بذراع روبوتي. وغالبًا ما يكون الروبوت مزوَّدًا بكاميرتين؛ واحدة على جسم الروبوت، والأخرى مثبَّتة في نهاية ذراعه. ولهذه الكاميرا المثبَّتة على ذراع الروبوت أهمية خاصة؛ لأنها تتيح لخبير إبطال مفعول القنابل القدرةَ على التحكم في ذراع الروبوت عن بُعد من أجل ضبط وضع الكاميرا، حتى يتمكن من البحث، عبر الكاميرا، عن أي شيء مريب. وإضافةً إلى الكاميرا (الكاميرتين)، عادةً ما يحتوي الروبوت أيضًا على ميكروفونات وأجهزة استشعار للمواد الكيميائية أو البيولوجية أو النووية، حتى يتمكن المشغل من تحديد ماهية «القنبلة»

والطريق الأفضل للتعامل معها. وتحتوي العديد من هذه الروبوتات على قابض في نهاية ذراع الروبوت لاستخدامه في حالة الحاجة إلى فتح باب، أو التعامل مع الجهاز المشبوه أو تحريكه، على سبيل المثال.

(٣-٣) الطائرات بدون طيار

يُشار إلى الطائرات المشغَّلة عن بعد عمومًا باسم الطائرات بدون طيار. وقد تكون ذات أجنحة ثابتة أو ذات أجنحة دوَّارة (مثل الطائرات الهليكوبتر)، وفي المجال العسكري، تُعرف الطائرات الأكثر شهرةً من هذا النوع، وأكثرها إثارة للجدل أيضًا، باسم طائرات «الدرون». وعلى عكس معظم الروبوتات الأخرى المشغَّلة عن بعد، تتمتع الأنواع الحديثة من الطائرات بدون طيار بدرجة عالية من الاستقلالية. ولما كانت هذه الطائرات مزوَّدة بجهاز استقبال لتحديد المواقع للملاحة عبر الأقمار الصناعية ونظام الربان الآلي، فهي عادةً ما تستطيع اتباع مسار للوصول إلى وجهة معيَّنة، عبر مجموعة من العلامات التوجيهية، مع تدخل بسيط من الطيار المتحكم عن بُعد أو من دون أي تدخل منه، وذلك بكفاءة تُضاهي ما تتمتع به الطائرات التجارية الحديثة التي يوجهها طيار. وعادةً ما تكون الطائرات بدون طيار قادرةً على الإقلاع والهبوط بشكل مستقل، وهو أمر يصعب القيام به عن بُعد لطائرة صغيرة. وبهذا، يتسنى لمُشغِّل الطائرات بدون طيار أن يُركِّز بشكل أساسي على مراقبة حالة المركبة وموقعها، وعلى جمع بيانات المراقبة والصور بالطبع.

(٣-٤) مركبات الكواكب الجوالة

للروبوتات المشغَّلة عن بعد لاستكشاف الأسطح، والتي يُشار إليها عمومًا باسم مركبات الكواكب الجوالة، تاريخٌ مميَّز يعود إلى سبعينيات القرن الماضي ومركبة لونوخود الجوالة لاستكشاف القمر، ولا تقتصر أهمية هذه المركبات على ما قدَّمته لنا من معارف رائعة عن سطح القمر، ومؤخرًا عن سطح كوكب المريخ، بل قدَّمت لنا أيضًا أمثلةً مُلهِمة في هندسة علم الروبوتات. ومركبات الكواكب الجوالة هي روبوتات متنقلة تعمل عن بعد، وتنطوي على عدد من التحديات الصعبة للغاية للمصمِّم والمشغِّل. يتمثل أحد التحديات في الطاقة؛ إذ يجب أن تكون مركبة الكواكب الجوالة مكتفية ذاتيًّا في الحصول على الطاقة طوال فترة مهمتها، ويجب إما إطلاقها وهي مزوَّدة بمصدر طاقة، وإما أن تكون مزوَّدة بألواح

شمسية قادرة على إعادة شحن البطاريات المُركَّبة في المركبة الجوالة، كما هو الحال مع مركبات المريخ الجوالة.

شكل ٢-٣: مركبة جوالة لاستكشاف المريخ

يكمن التحدي الآخر في الاعتمادية. ذلك أنَّ أي عطل ميكانيكي سيَتسبَّب على الأرجح في إنهاء مهمة المركبة الجوالة؛ ومن ثَم يجب تصميمها وبناؤها وفقًا لمعايير استثنائية من الموثوقية والسلامة من الأعطال، بما يسمح للروبوت أن يستمر في العمل إذا تعطلت أجزاء من المركبة الجوالة، وإن كان ذلك بأداء وظيفي منخفض. تُعَد درجات الحرارة المتطرفة من المشكلات أيضًا، لا سيما البرودة؛ لأن المكونات الإلكترونية لن تعمل في درجة حرارة أقل من ٥٠ درجة مئوية تحت الصفر. ومن ثَم، تحتاج المركبات الجوالة، مثل السفن الفضائية، إلى أجهزة تدفئة وعزل من أجل أجهزتها الإلكترونية.

غير أنَّ التحدي الأكبر هو التواصل. فمع تأخُّر الإشارات المرسَلة من المريخ وإليه لمدة عشرين دقيقة، يستحيل تشغيل المركبة الجوالة عن بعد بصورة آنية. إذا كانت المركبة

الجوالة تتحرك ومُشغِّلها البشري في مركز القيادة على الأرض يحاول تفادي أحد العوائق، فالأرجح أنَّ الأوان فات بالفعل؛ سيكون الروبوت قد اصطدم بالعائق في الوقت الذي تصل فيه إشارة الأمر بالانعطاف إلى المركبة الجوالة. ويبدو أن الحل الوحيد لهذه المشكلة هي منح المركبة الجوالة درجة من الاستقلالية بحيث يمكنها، على سبيل المثال، تخطيط مسارها إلى صخرة أو نقطة محل اهتمام — مع تجنب العقبات في الوقت ذاته — وعندما تصل إلى النقطة محل الاهتمام، تتصل بمركز القيادة وتنتظر. على الرغم من التطور الكبير الذي شهدته خوارزميات تخطيط المسار القادرة على هذا المستوى من الاستقلالية، فإنَّ احتمالية فشل الخوارزمية (ومن ثَم احتمالية فشل المهمة بأكملها) مرتفع للغاية، لدرجة أنَّ المركبات الجوالة تُشغَّل يدويًّا عن بعد في واقع الأمر، مع الالتزام بمستوى سرعة منخفض جدًّا والتخطيط بعناية لكل مناورة يدوية. وإذا أخذنا في الحسبان أيضًا حقيقة أن مركبات المريخ الجوالة لا يمكن الاتصال بها إلا خلال ثلاث ساعات في اليوم المريخي، فإن اجتياز ١٠٠ متر يستغرق عادةً يومًا واحدًا من التشغيل بمتوسط سرعة ٣٠ مترًا في الساعة.

(٣-٥) الروبوتات الجراحية

على عكس مركبات الكواكب الجوالة، فإن المجال التشغيلي للروبوتات الجراحية هو الأماكن المغلقة. إذا كنت بحاجة إلى إجراء عملية جراحية في البروستاتا، فمن المحتمل أن يُجريَها لك روبوت أو بالأحرى جرَّاح يتحكم في روبوت عن بعد. لا يخفى على أحدٍ فوائدُ الجراحة التي تنطوي على الحد الأدنى من التدخل، أو جراحة ثقب المفتاح، لكن الدقة والبراعة التي يمكن للجراح بها التحكم يدويًّا في الأدوات محدودة. ويوفر الروبوت الجراحي فرصة للتغلب على هذا القصور من خلال خاصية التحكم عن بعد.

عادةً ما تتضمن الجراحة بالمنظار عمل عدد من الشقوق عبر البطن وصولًا إلى الموقع الذي يتطلب الجراحة. بعد ذلك، تُدخَل الكاميرات والإضاءة عبر أحد الشقوق ليتمكن الجرَّاح من إلقاء نظرة عن قرب على مكان إجراء العملية، وربما تكون ثلاثية الأبعاد. وتُدخَل الأدوات، مثل المباضع الصغيرة الحجم أو الملقط أو إبر الخياطة عبر الشقوق الأخرى حتى يتمكن الجراح من إجراء العملية في أثناء النظر من خلال الكاميرات.

يتحكم الجراح في الأدوات عن بعدٍ عبر زوج خاص من أدوات التحكم اليدوية. والجدير بالذكر أن نظام التحكم في الروبوت يقلص بعد ذلك حركات يد الجرَّاح

وأصابعه؛ فعندما يُحرِّك الجرَّاح يديه بمقدار ٠٫٥ سنتيمتر تقريبًا تتحرك الأداة الجراحية بمقدار ٠٫٥ ملِّيمتر. وقد يتجاهل الروبوت أيضًا أي ارتعاش في يدَي الجرَّاح كي تكون حركات أدوات الجراحة المجهرية سلِسة ودقيقة. في المعتاد، توجد وحدة تحكم الجرَّاح فعليًّا داخل غرفة العمليات، حيث المريض الذي يخضع للعملية الجراحية والفريق الطبي بأكمله، لكن ذلك ليس ضروريًّا بالطبع؛ فمن مزايا هذا النهج إمكانية إجراء الجرَّاح للعملية من مكان مختلف.

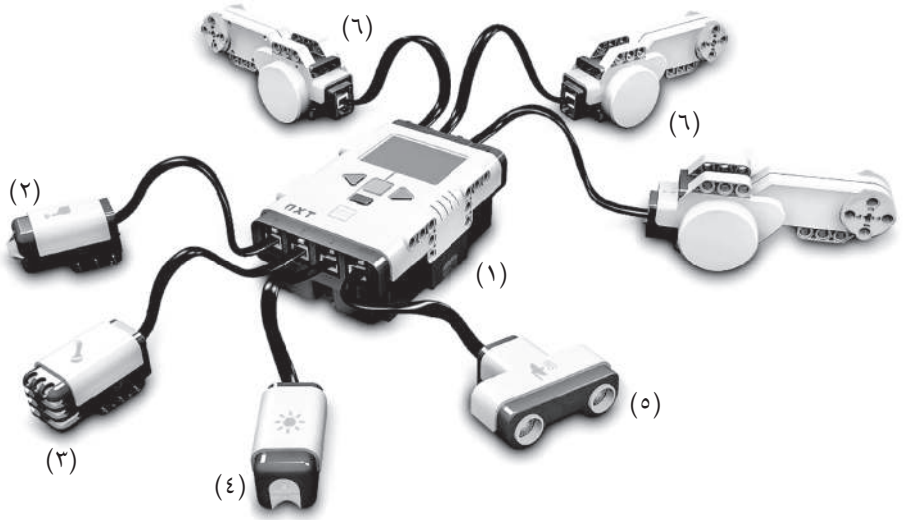
(٤) روبوتات قابلة للتعلم

كان نظام «ليجو مايندستورمز» إنجازًا بارزًا في تطوير الروبوتات القابلة للتعلم، والآن قد ظهر الجيل الثاني منه باسم «ليجو إن إكس تي». تطور نظام «ليجو إن إكس تي» بالتعاون مع مختبر الوسائط بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وهو يُستخدم على نطاق واسع لدعم تدريس علم الروبوتات، ويحظى بتقدير جيد في مجتمع علم الروبوتات. يوجد في قلب النظام وحدة تحكم قابلة للبرمجة تُسمى المكعب الذكي إن إكس تي (انظر الشكل ٢-٤).

مثلما يتضح في الشكل، يحتوي نظام ليجو إن إكس تي الأساسي على ثلاث وحدات محرِّك وأربع وحدات استشعار مختلفة، إضافةً إلى المكعب (١). وتعتمد وحدات المحرك (٦) على محركات مؤازِرة مزوَّدة بصناديق تروس لتخفيض السرعة وأجهزة تشفير عمود الدوران. تستطيع أجهزة تشفير عمود الدوران استشعار موضع عمود الخرج في حدود درجة واحدة من الدقة؛ مما يعني إمكانية استخدامها كمُشغِّلات لضبط موضع مفصل ذراع الروبوت، على سبيل المثال، بدقة جيدة.

وحدة الاستشعار (٢) هي مستشعر لمس بسيط ثنائي التشفير، ينتج قيمة خرج ٠ إذا لم يُضغَط عليه، أو ١ إذا ضُغط عليه. وتُمثِّل وحدة الاستشعار (٣) مستشعر صوت تناظري تتراوح قيمة خرجه بين ٠ للصمت و١٠٠ للأصوات العالية جدًّا. أما الوحدة (٤) فهي مستشعر ضوء تناظري تتراوح قيمة خرجه بين ٠ و١٠٠ (من الظلام الدامس إلى الضوء الساطع). وتشتمل الوحدة أيضًا على مصباح لإضاءة أي جسم. ويمكن استخدام مستشعر الضوء بمفرده أو مع المصباح، لقياس سطوع ضوء المصباح المنعكِس؛ ومن ثَم مدى بُعد الجسم.

وحدة الاستشعار (٥) هي مستشعر لقياس المسافات بالموجات فوق الصوتية، ولديها القدرة على اكتشاف مدى بُعد جسم ما على مسافة تصل إلى ٢٣٣ سنتيمترًا،



شكل ٢-٤: ليجو مايندستورمز إن إكس تي «الجهاز العصبي المركزي»

بدقة ٣ سنتيمترات؛ وتتمكن الوحدة أيضًا من استشعار الحركة. توجد أيضًا مستشعرات إضافية غير موضَّحة بالشكل، ومنها مستشعر اللون ومستشعر درجة الحرارة، إضافةً إلى وحدات من جهات خارجية تتضمن البوصلة ومقياس التسارع.

عند مقارنة الصورة في الشكل ٢-٤ بالشكل ١-٢ في الفصل الأول، فإنَّ ما نراه هو «الجهاز العصبي المركزي» الكامل لروبوت ليجو إن إكس تي، كما لو كان معروضًا أمامنا على طاولة التشريح. فبإمكاننا رؤية «الدماغ» وإمدادات الطاقة (في المكعب) و«أجهزة الاستشعار» و«العضلات» لتوفير إمكانية التنقل، والأسلاك (التي تمثل «الأعصاب»). ما ينقص هنا هو الجسم — المكونات الهيكلية — والبرنامج الذي يصنع روبوتًا معينًا بوظيفة معينة بالطبع.

يمكن إدخال البرامج البسيطة جدًّا مباشرةً على المكعب باستخدام نظام بسيط يتكون من قائمة وأزرار، لكن البرامج الأكثر تعقيدًا فيمكن تصميمها على كمبيوتر محمول أو كمبيوتر شخصي وتنزيلها على المكعب. إن مجموعة أدوات البرمجة (من المبتدئين إلى الخبراء)، وحقيقة أن ليجو أصدرت ترخيصًا مفتوح المصدر لأجهزة إن إكس تي وبرامجها تعني أن هذا النظام لتطوير الروبوتات التركيبية عظيم الفائدة، ليس في

مجال التعليم فحسب، بل أيضًا باعتباره منصة مرنة للغاية لاختبار الأفكار البحثية. وعند إجراء بحث على الإنترنت سرعان ما نكتشف أن هناك مجموعة كبيرة من نماذج الروبوتات التي تطورت باستخدام ليجو إن إكس تي، بما في ذلك الروبوتات التي تحل مكعب روبيك، والروبوت الذي يمكنه التوازن على عجلتين، ومصنع نماذج ليجو إن إكس تي المؤتمت بالكامل الذي يجمِّع سيارات ليجو.

(٥) تصنيف الروبوتات

ليس من السهل تحديد موقع أي روبوت معين في شجرة عائلة جميع الروبوتات. فصحيح أنَّ بعض الروبوتات، لا سيما تلك الموجودة في التطبيقات الراسخة، لها أوصاف واضحة مثل الطائرات بدون طيار (التي تُعرف أيضًا باسم طائرات الدرون)، لكن العديد من الروبوتات عادةً ما تُوصَف بطريقة مخصَّصة إلى حد ما. على سبيل المثال، تخبرنا الصفة humanoid (هيومانويد) أن الروبوت قد يكون له شكل يشبه الإنسان، لكنها لا تخبرنا بأي تفاصيل أخرى فيما عدا ذلك. فهي لا تخبرنا بما إذا كان الروبوت الذي يتخذ هيئة الإنسان يستطيع السير أم إن الجزء العلوي من الجسم غير متحرك، كما أنها لا تشير إلى استخداماته الممكنة، أو ما إذا كان يُشغَّل عن بعد أم يعمل بشكل مستقل.

غير أنَّ علم الروبوتات يتضمن عددًا من المصطلحات المقبولة عمومًا لتصنيف الروبوتات. وهي تشكل معًا تصنيفًا واسع النطاق يفيد في فهم صلة القرابة بين الروبوتات (ليس بالمعنى الحرفي بالطبع)، وموقع أي روبوت من شجرة عائلة الروبوتات بأكملها.

تندرج هذه المصطلحات في ست فئات. الفئة الأولى هي التنقل: فالروبوتات الثابتة غير متنقلة (على الرغم من أنها ربما تتمتع بالقدرة على أداء بعض الحركات بالطبع، على سبيل المثال تحرك روبوت الطلاء بالرش). والروبوتات المتنقلة قادرة على التنقل ذاتيًّا، بالأرجل، أو العجلات، أو الأجنحة، أو أي شيء يمنح الروبوت القدرة على التنقل في بيئة عمله.

تخبرنا الفئة الرئيسية الثانية، وهي كيفية التشغيل، بما إذا كان الروبوت يُشغَّل عن بعد أو يعمل بشكل مستقل. لكن على عكس الفئة السابقة، لا يتسم التمييز بالوضوح؛ فالتصنيف «مستقل» يغطي نطاقًا واسعًا من الروبوتات ودرجات مختلفة من الاستقلالية. وتصنف الفئة الثالثة الروبوت حسب شكله: فقد يكون بشريًّا؛ أي يشبه الإنسان إلى حد

ما، أو حيوانيًّا؛ أي له جسد يشبه جسد الحيوانات، أو ما أُسميه آليًّا؛ أي روبوتًا لا يشبه الإنسان ولا الحيوان.

تتحدد الفئة الرابعة التي أقترحها من خلال التفاعل بين الإنسان والروبوت. بمعنًى آخر، هل الروبوت مُصمَّم للتفاعل مع البشر أم لا؟ هذه الفئة مفيدة لأن العديد من الخصائص الأخرى للروبوتات التي تتفاعل مع البشر، لا سيما السلامة والموثوقية، أصبحت مهمة. وتخبرنا الفئة الخامسة، وهي التعلم، بما إذا كان لدى الروبوت مجموعة ثابتة من السلوكيات أو أنه قادر على التعلم؛ ومن ثَم تكييف سلوكه أثناء التشغيل.

لقد أدرجت الفئة السادسة والأخيرة، ألا وهي الاستخدام؛ إذ جرى العرف في مجال علم الروبوتات على تصنيف الروبوتات على أنها روبوتات صناعية أو روبوتات خدمة. ويضع الاتحاد الصناعي للروبوتات تعريف الروبوت الصناعي بأنه «جهاز ميكانيكي للتحكم في المواد، متعدد الأغراض، قابل لإعادة البرمجة، ذاتي التحكم ... ويُستخدم في تطبيقات الأتمتة الصناعية»، ويُعرَّف روبوت الخدمة (مؤقتًا) على أنه «روبوت يعمل بشكل مستقل أو شبه مستقل لأداء خدمات مفيدة للبشر والمعدات، باستثناء مجال التصنيع».

يوضح الجدول ٢-١ الفئات العالية المستوى وأقسامها.

جدول ٢-١: تصنيف الروبوتات

الفئة	الأنواع الرئيسية	الأنواع الفرعية (إن وُجدت)
التنقل	ثابت (غير متنقل)	
	متنقل	يتنقل عن طريق العجلات/المسارات/الأرجل/الطيران/السباحة
كيفية التشغيل	عن بُعد	
	مستقل	
الشكل/المورفولوجيا	بشري	شكل الإنسان/شكل الإنسان وصفاته
	حيواني	
	آلي	
التفاعل بين الإنسان والروبوت	يتفاعل مع البشر	أو يتفاعل مع الحيوانات

الفئة	الأنواع الرئيسية	الأنواع الفرعية (إن وُجدت)
	لا يتفاعل مع البشر	
التعلم	سلوك ثابت	
	متكيف	
التطبيقات	روبوت صناعي	جهاز ميكانيكي للتحكم في المواد، متعدد المحاور للأتمتة الصناعية
	روبوت خدمة	انظر الجدول ٢-٢

إن مجموعة التطبيقات التي نرى فيها روبوتات الخدمة كبيرة جدًّا حقًّا. يوضح الجدول ٢-٢ بعض التطبيقات الراسخة إضافةً إلى أمثلة نموذجية للروبوتات المستخدَمة في كل تطبيق ومواصفاتها ضمن التصنيف المذكور بالأعلى.

جدول ٢-٢: تطبيقات روبوتات الخدمة ومواصفاتها

تطبيقات روبوتات الخدمة	المثال	المواصفات
الزراعة	روبوت حلب الأبقار من فولوود ميرلين	ثابت، مستقل، آلي الشكل، يتفاعل مع الحيوانات، سلوك ثابت
الفنون والترفيه	روبوثيسبيان من إنجينيرد آرتس إل تي دي	ثابت، مستقل، بشري الشكل، يتفاعل مع البشر
المساعدة في المعيشة	آي أرم من إكزاكت ديناميكس (ذراع روبوتية ذكية تتحكم في الأجسام)	ثابتة، تعمل عن بُعد، آلية الشكل، تتفاعل مع البشر، سلوك ثابت
نقل المواد	نظام التوصيل الروبوتي المؤتمت «تَج» من شركة أيثون	متنقل، مستقل، آلي الشكل، يتفاعل مع البشر، سلوك ثابت

تطبيقات روبوتات الخدمة	المثال	المواصفات
التنظيف	المكنسة الروبوت «رومبا» من شركة آي روبوت	متنقلة، مستقلة، آلية الشكل، لا تتفاعل مع البشر، سلوك ثابت
سيارات تعمل من دون سائق	غير متاحة حاليًّا في الأسواق	متنقلة، مستقلة، آلية الشكل، تتفاعل مع البشر، متكيفة
الهوايات والتعلم	ليجو مايندستورمز إن إكس تي	تعتمد المواصفات على التصميم
الاستكشاف	مركبتا ناسا الجوالتان لاستكشاف كوكب المريخ «سبيريت وأبورتيونيتي»	متنقلتان، تعملان عن بُعد، كلاهما آلي الشكل، لا تتفاعلان مع البشر، سلوك ثابت
الأطراف الصناعية	اليد الصناعية آي-ليم من تاتش بيونكس	ثابتة، تعمل عن بُعد (من خلال أقطاب كهربائية متصلة بالجلد)، بشرية الشكل، تتفاعل مع البشر
البحث والتعليم	ناو من ألديباران روبوتكس	متنقل، مستقل، بشري الشكل، يتفاعل مع البشر، متكيف
البحث والتفتيش (الدفاع والتصدي للكوارث)	باك بوت من آي روبوت	متنقل، يعمل عن بُعد، آلي الشكل، لا يتفاعل مع البشر، سلوك ثابت
الجراحة	الروبوت دافنشي من إنتويتيف سيرجيكال إنك	ثابت، يعمل عن بُعد، آلي الشكل، يتفاعل مع البشر، سلوك ثابت
الحضور عن بُعد	في جو من في جو كوميونيكيشنز	متنقل، يعمل عن بُعد، آلي الشكل، يتفاعل مع البشر

تطبيقات روبوتات الخدمة	المثال	المواصفات
الروبوتات العلاجية أو الرفيقة	جرو الفقمة بارو من شركة إنتيليجنت سيستمز	غير متنقل، مستقل، حيواني الشكل، يتفاعل مع البشر، متكيف
الألعاب والترفيه	الديناصور الأليف المتحرك بليو من إنفو لابس	متنقل، مستقل، حيواني الشكل، يتفاعل مع البشر، متكيف

وصف هذا الفصل عدة أنواع من الروبوتات الموجودة في العالم الحقيقي، بدءًا من المصانع حتى الفصول الدراسية بالمدارس. وتشير التقديرات إلى أنه يوجد حاليًّا أكثر من ثمانية ملايين روبوت قيد الاستخدام. إن نطاق الروبوتات الحالية والوظائف التي تقوم بها واسع للغاية، ويوضح أن عددًا قليلًا فقط من مجالات المساعي البشرية هي التي لم تستفِد بالفعل، إلى حد ما، من تكنولوجيا الروبوتات. لقد كان التأثير كبيرًا جدًّا في بعض المجالات، مثل التصنيع، لكن إمكانات الروبوتات لم تتحقق بعد في العديد من المجالات الأخرى.

الفصل الثالث

الروبوتات الحيوية

منذ أواخر ثمانينيات القرن العشرين، حدث تغيرٌ جذري في كيفية تعاملنا مع تصميم الروبوتات الذكية، التي غالبًا ما توصف بأنها «إلهام أحيائي»، أو روبوتات مستوحاة من علم الأحياء. لكن هذا التغيير أعمق بكثير من الإلهام فحسب؛ ولن يستلزم الأمر سوى التفكير في ليوناردو دافنشي لندرك أن المصممين والمهندسين استلهموا أفكارهم من الطبيعة على مدار القرون. وفي مجال الروبوتات الذكية، ينطوي الاستلهام من علم الأحياء على شيئين.

أولًا: أن تخضع الطريقة التي نتعامل بها مع تصميم الروبوت إلى مراجعة شاملة، وعدم التعامل معه باعتباره تطبيقًا هندسيًّا بحتًا، بل مجال متعدد التخصصات يتداخل مع العلوم الحياتية. ففي أحيان كثيرة، تضم الأبحاث في مجال الروبوتات الذكية عدةَ علوم أخرى، منها الكيمياء الحيوية وعلم الأحياء وعلم الأعصاب وعلم سلوك الحيوان.

ثانيًا: أن الروبوتات ليست مستوحاة من الطبيعة فحسب، بل تُصمَّم مباشرةً على غرار نماذج أو أنظمة موجودة في الطبيعة، أو تكون هي نفسها تجسيدًا لتصميمات الطبيعة وأنظمتها. يُعرف هذا النوع الأخير باسم روبوتات المحاكاة الحيوية. وهذا يعني أنه لا ينبغي لنا التفكير بعد الآن في الروبوتات على أنها محض آلات للقيام بعمل ما، بل على أنها — في نطاق ضيق للغاية — نماذج للأنظمة الحية. ربما على أنها حيوانات اصطناعية. لقد نشأ مجال جديد بالفعل يُعرف باسم الحياة الاصطناعية، يستخدم نماذج المحاكاة بالكمبيوتر أو الروبوتات المادية الحقيقية لتصميم نماذج من الأنظمة أو العمليات الحية.

(١) كيفية تصميم روبوت مستقل

ثبِّت محركَين بسيطين منخفضَي الطاقة، مزوَّدَين بعجلات، على جانبَي هيكل روبوت صغير. ثم ضع لوحَين شمسيَّين منخفضَي التكلفة على جانبَي الروبوت بحيث يبدوان مثل الجناحين إلى حد كبير. ووصِّل خرج اللوح الشمسي الأيسر بالمحرك الأيمن عن طريق سلك، والعكس صحيح. تلك هي الطريقة التي صمَّم بها مهندس الروبوتات كريس بايذاواي مثل هذا الروبوت.

يتصرف هذا الروبوت الصغير، المسمَّى سولاربوت، بالطريقة التالية. يشغِّل كلا المحركين، بالدرجة ذاتها تقريبًا، ضوءٌ قوي يُضيء بنفس الشدة على جناحَي الروبوت، ويتقدم الروبوت إلى الأمام باتجاه مصدر الضوء. من ناحية أخرى، إذا كان الجناح الأيمن مظلمًا لكنَّ الجناح الأيسر مضاء، فعندئذٍ سيعمل المحرك الأيمن فقط، وسيتوقف المحرك الأيسر؛ ومن ثَم يستدير الروبوت إلى اليسار، كما لو كان يحاول الوصول إلى الضوء. وإذا حدث العكس، أي كان الجناح الأيسر مظلمًا والآخر مضاءً، فسيستدير الروبوت إلى اليمين. ونتيجةً لذلك، يمكن للروبوت أن يشقَّ طريقه عبر مسار به عقبات بسيطة نحو الضوء. ويُقال إن سولاربوت استجابة إيجابية للضوء، ويتمتع بنوع بسيط من تجنب العوائق. يوجه سولاربوت نفسه أيضًا نحو الضوء إذا لم يكن في مواجهته مباشرةً.

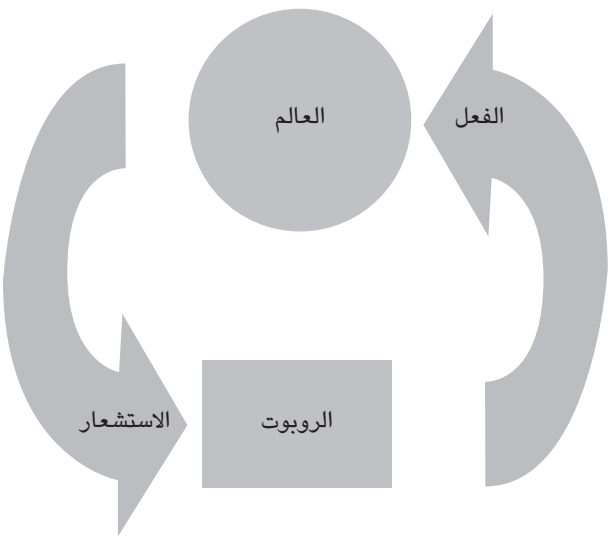
يقدم لنا سولاربوت مثالًا توضيحيًّا رائعًا على أن السلوكيات البسيطة الهادفة لا تتطلب أي أجهزة كمبيوتر على الإطلاق. ويُعَد سولاربوت مثالًا على ما يشير إليه علماء الروبوتات بآلة برايتنبرج.

في كتابه الصادر عام ١٩٨٤ بعنوان «المركبات»، أوضح برايتنبرج، من خلال مجموعة رائعة من التجارب الفكرية، أن مجرد توصيل المستشعرات والمحركات بالطريقة التي ذكرتها يمكن أن ينتج سلوكيات انعكاسية بسيطة ذات تطور مذهل. وما يوضحه سولاربوت أيضًا هو أن روبوتًا بسيطًا بدون دماغ (من جانب ما) يمكن أن يصدر سلوكًا هادفًا ومثيرًا للاهتمام، بينما يوضح في الوقت ذاته أن السلوكيات خاصية ناجمة عن التفاعل بين الروبوت وبيئة العمل الخاصة به. فسلوكيات الروبوت هي خاصية منبثقة عن تلك التفاعلات.

علاوةً على ذلك، يرتبط مدى تعقيد تلك السلوكيات بمدى تعقيد البيئة. لهذا إذا وُضع سولاربوت في غرفة مظلمة، فلن يفعل شيئًا على الإطلاق. وفي غرفة فارغة بلا عوائق وبها مصدر ضوء واحد، لن يثير سلوك الروبوت الاهتمام بشكل كبير؛ إذ يتجه ببساطة

نحو مصدر الضوء حتى يصطدم به (ثم يستمر دون جدوى في أن «يتغذى» على الطاقة الشمسية ويوجه محركاته إلى الأمام دون توقف). فنحن نتمكن من رؤية جميع سلوكيات سولاربوت إلا في وجود مجموعة من العوائق التي تخلق بقعًا من الظل.

يوضح لنا سولاربوت أيضًا أن الروبوت المستقل ليس من الضروري أن يكون معقدًا. الحق أنَّ الروبوتات المستقلة، وعلى نحو غير متوقَّع، غالبًا ما تكون أبسط من الروبوتات المُشغَّلة عن بُعد (تخيلْ مدى تعقيد أنظمة التحكم والإلكترونيات التي سينبغي وجودها في سولاربوت حتى تتمكن من توجيهه عبر متاهة من خلال جهاز تحكم لا سلكي). إن إدراك أن سلوك الروبوت المستقل هو خاصية منبثقة من تفاعلاته مع العالم حوله له تبعات مهمة وبعيدة المدى على الطريقة التي نصمم بها الروبوتات المستقلة.



شكل ٣-١: حلقة ردود الفعل المتبادلة بين الروبوت والعالم

يُوضِّح الشكل ٣-١ ما يُسميه علماء الروبوتات حلقة التحكم الخارجية للروبوتات المستقلة. توصف الحلقة بأنها: «مغلقة من خلال بيئة عمل الروبوت.» ما يعنيه هذا هو أن الروبوت يستشعر بيئته، وأن القيم التي تتلقاها المستشعرات الخاصة به تؤدي بطريقة ما إلى مخرجات حركية جديدة (مباشرة في حالة سولاربوت). عندئذٍ يتحرك الروبوت (كله

أو جزء منه)، ونتيجةً لهذه التحركات، من المرجَّح أن تتلقى مستشعرات الروبوت قيمًا مختلفة. وربما تولد قيم أجهزة الاستشعار الجديدة هذه سلوكيات مختلفة، تؤدي بدورها إلى تحرك الروبوت، وما إلى ذلك. وبهذه الطريقة تُغلَق حلقة الاستشعار والفعل الخاصة بالروبوت. وهنا يظهر السؤال الآتي: ماذا يعني هذا بالنسبة لعلماء الروبوتات؟

حسنًا، أولًا، عندما نُصمِّم الروبوتات، وخاصةً عندما نُقرِّر السلوكيات التي نبرمج بها الذكاء الاصطناعي للروبوت، لا يمكننا التفكير في الروبوت بمفرده. لا بد أن نراعي كل تفاصيل بيئة عمل الروبوت. إذا كانت هذه البيئة بسيطة، بمعنى أن المصمم يمكنه قياس أو تحديد كل شيء قد يواجهه الروبوت ويتفاعل معه (والكيفية التي ستُصرِّف بها هذه الأجسام نفسها)، فربما لا تتسم مهمة تصميم الروبوت وسلوكياته حينها بالصعوبة البالغة. من ناحية أخرى، إذا كانت البيئة التي سيعمل فيها الروبوت غير معروفة (مثل سطح كوكب غير مستكشف)، أو معروفة لكنها غير متوقَّعة، فلن يكون التنبؤ بكل موقف محتمل قد يواجهه الروبوت، ومن ثَم تصميم روبوت يتفاعل مع كل تلك الاحتمالات، صعبًا فحسب، بل مُحال أيضًا. تشمل هذه الحالة الأخيرة بالطبع، وهي حالة أن البيئة معروفة لكنها غير متوقعة، كل بيئة بشرية قد نحتاج فيها إلى الروبوتات، مثل: أماكن معيشة البشر، وأماكن اللعب، وأماكن العمل، بما في ذلك الطرق والأماكن الحضرية المفتوحة.

ثانيًا، يتسبب هذا في أن يصبح اختبار الروبوت المستقل أمرًا صعبًا، وخاصةً إثبات أنه سيتصرف دائمًا كما هو متوقَّع (تذكر أن هذه السلوكيات هي خصائص منبثقة عن التفاعل بين بيئة العمل والروبوت). عند وضع روبوت بسيط له سلوكيات محددة تمامًا (مثل سولاربوت) في بيئة غير متوقعة، يصبح من المستحيل توقع ما سيفعله الروبوت بالضبط. وهذا لا يسبب مشكلة لروبوتات المختبر مثل سولاربوت، ولكن إذا كان الروبوت مطلوبًا للعمل، على سبيل المثال مع البشر، فإن إثبات أن الروبوت سيكون دائمًا آمنًا، والتصديق على ذلك، يصبح تحديًا كبيرًا للغاية.

لا شك أنَّ الروبوتات المستقلة في بيئات العمل غير المتوقعة (خاصةً البشرية) لا تزال تقنية جديدة وناشئة، لكن ربما يكون الأمر أنها تحتاج إلى نُهُج جديدة للتصميم والتصديق، نُهُج ربما تحيد تمامًا عن الممارسات الهندسية التقليدية التي تراعي الدقة في تحديد كل شيء وتصميمه واختباره. فالعالم الطبيعي مكان معقَّد، ومعظم الحيوانات البسيطة تعيش دون أن تكون على دراية بنسبة ١٠٠ بالمائة بكل ما يدور حولها، أو أن يكون لديها استجابات سلوكية لكل الاحتمالات الممكنة. ربما سيشير النهج المستوحى

من علم الأحياء إلى أن الروبوتات المستقلة مصمَّمة لتكون على درجة كافية من الجودة والأمان، للقيام بالمهمة المطلوبة منها، وليس أكثر من ذلك.

(٢) الروبوتات القائمة على السلوك

في سبعينيات القرن الماضي، كانت الروبوتات المتنقلة التجريبية المستقلة تتحرك ببطء وتردد عبر العقبات الموضوعة في طريقها. لم يكن لبطئها علاقة بضعف المحركات أو إمكانية التنقل أو عدم فعاليتهما. كان ذلك لأن هذه الروبوتات، التي يمثلها الروبوت البارز «شاكي» التابع لمعهد ستانفورد للأبحاث، لديها أنظمة تحكم تعتمد على نهج الذكاء الاصطناعي السائد في ذلك الوقت، والمعروف باسم التمثيل الرمزي.

استخدمت الروبوتات مثل «شاكي» طريقة تحكم تشاورية تُعرف باسم «الاستشعار–التخطيط–الفعل». الفكرة التي يستند إليها هذا النهج أن يستخدم الروبوت البيانات الواردة من مستشعراته لتكوين تمثيل داخلي لعالمه والاحتفاظ به. فعلى سبيل المثال، يلتقط الروبوت صورة بالكاميرا الخاصة به، ومن خلال معالجة الصور، يتعرف على الأجسام في مجال رؤيته، ويحدد مكان الزوايا والحواف، والفجوات بين الأجسام المختلفة؛ ومن ثَم يرسم نوعًا من الخريطة المكانية لما «يراه». ويستخدم الروبوت هذه الخريطة الداخلية للتخطيط لحركته التالية قبل تنفيذ هذه الحركة فعليًّا، ليكمل بذلك دورةً واحدة من دورات «الاستشعار–التخطيط–الفعل». بعد ذلك، يتحرك الروبوت للأمام ربما بضعة سنتيمترات، ثم يلتقط مجددًا صورةً أخرى ويبدأ في تنفيذ دورة جديدة من «الاستشعار–التخطيط–الفعل».

وهنا تكمن المشكلة. فنظرًا لأن الروبوت قد تحرك، فإن طريقة رؤيته للعالم صارت الآن مختلفة؛ ومن ثَم يتعين عليه إجراء بعض العمليات الحسابية المعقدة إلى حدٍّ ما لاستنتاج، على سبيل المثال، أن الكتلة الحمراء الموجودة على اليسار هي نفس الكتلة الحمراء التي «رآها» في الصورة السابقة (حيث تغيرت نظرته لهذا الجسم)؛ ومن ثَم يحافظ على خريطته الداخلية ويحدِّث موقعه واتجاهه في تلك الخريطة.

من السهل أن ترى أن هذه عملية معقَّدة وبطيئة، حتى في البيئات الساكنة تمامًا حيث يكون الشيء الوحيد الذي يتحرك هو الروبوت نفسه. إنَّ جسدًا متحركًا واحدًا في مجال رؤية الروبوت، شخصًا ما على سبيل المثال، يمكن أن يتسبب في عجز الروبوت عن الحركة، وعدم قدرته على مطابقة ما «يراه» مع خريطته الداخلية والتخطيط لخطوته

التالية. قارن هذا مع سولاربوت، الذي لا يخطط على الإطلاق: فنظام التحكم الخاص به هو مجرد استشعار–فعل، أو رد فعل.

في منتصف الثمانينيات، أدرك عالم الروبوتات في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا رودني بروكس أن النهج السائد للتحكم في الروبوتات المتنقلة المستقلة ينطوي لا بد على خطأ ما. واتَّجه تفكيره إلى ما يلي. معظم الحيوانات على هذا الكوكب، الحشرات على سبيل المثال، لا تمتلك آلية الإدراك لتكوين التمثيلات الداخلية للبيئات الديناميكية المعقدة التي يتعين عليها العيش فيها، والحفاظ أيضًا على هذه التمثيلات. ومع ذلك، فإن هذه الحيوانات ناجحة للغاية في التنقل في بيئتها، والبحث عن الطعام، والتزاوج، وتجنب الحيوانات المفترسة. فهي لا تحتاج إلى تمثيل داخلي؛ لأن لديها العالم ذاته. والعالم، كما كتب بروكس، «أفضل نموذج لنفسه». وبناءً على هذا، يجب أن يكون الروبوت المتنقل، مثل الحشرة تمامًا، قادرًا على التجول في جميع أنحاء العالم، متجنبًا الاصطدام بالعوائق الثابتة مع الابتعاد بأمان عن الأجسام المتحركة، وذلك ببساطة عن طريق استشعار تلك الأجسام والتفاعل معها فقط عندما تقترب بما يكفي لتشكل تهديدًا.

في واحدة من أكثر الأوراق البحثية تأثيرًا في مجال الروبوتات الحديثة بعنوان «نظام تحكم قوي متعدد الطبقات لروبوت متنقل»، اقترح بروكس بديلًا لنهج «الاستشعار–التخطيط–الفعل»، ينطوي على تصميم نظام التحكم في الروبوت من طبقات مُرتَّبة تصاعديًّا، باستخدام مجموعة من «السلوكيات» المتفرقة لتنفيذ المهام. تقبل كل طبقة من هذه الطبقات مدخلات من مستشعرات الروبوت، وتتحكم في قيادة محركات الروبوت. تمثل الطبقات العليا مستويات أعلى من الكفاءة، وتعمل جميع الطبقات بالتوازي.

وفقًا لمجمل الأعمال التي صُمم الروبوت لتنفيذها، قد تكون هناك حاجة لوجود طبقات عالية المستوى لإنشاء خرائط لبيئة عمل الروبوت، لكن الأهم من ذلك أن السلوكيات المنخفضة المستوى مثل تجنب العوائق لن تعتمد على تلك الخرائط. وبهذا، سيتمكن الروبوت المصمم وفقًا لهذه الشروط من التحرك بأمان، والاستجابة للعقبات أو المخاطر بسرعة، وفي الوقت ذاته تحقيق أهداف ذات مستوًى أعلى مثل الانتقال من مكان إلى آخر.

يجمع النهج القائم على السلوك بين نقاط قوة النهج التفاعلي والنهج التشاوري، التي تتناسب مع طبقات مختلفة من وحدة التحكم في الروبوت. والأهم من ذلك أن السلوكيات مستقلة. فعلى سبيل المثال، ليست جميعها من السلوكيات التي يستلزم الاطلاع على

خريطة العالم. وقد يؤدي السلوك العالي المستوى إلى إنشاء خريطة والاحتفاظ بها، لكن السلوك المنخفض المستوى لا يحتاج إلى هذه الخريطة؛ فهو يتفاعل مباشرة مع مدخلات المستشعر. وبسبب استقلالية الطبقات السلوكية، ينتج سلوك الروبوت الملاحظ بشكل عام — ووظائفه — عن تفاعل سلوكيات الروبوت الفردية وتفاعل الروبوت مع بيئته.

يقدم روبوت مايا ماتاريك «توتو» المستوحى من علم الأعصاب مثالًا رائعًا جدًّا على هذا النهج. فقد أدى سلوك منخفض المستوى يُسمى «تتبع الحدود» إلى تزويد توتو بإمكانية التجول بدون اصطدامات من خلال العثور على حدود (أي الجدران) وتتبعها. وثَمة سلوك متوسط المستوى يُسمى «اكتشاف المعالم»، تتبع قراءات مستشعر توتو وتعرَّف على وجود معالم مثل جدار على يسار الروبوت أو على يمينه أو على كلا الجانبين، أي ممر. وثَمة سلوك عالي المستوى: «التوجه نحو هدف محدد وتعلم استخدام الخرائط»، قد تعلم هذا التسلسل من المعالم، ومن ثَم صمم خريطة؛ مما سمح لتوتو بالعثور على موقعه في الخريطة والتنقل إلى مواقع جديدة. وبما أنَّ الجرذان تتنقل بتتبع الحدود، حاجج ماتاريك أن الذكاء الاصطناعي لتوتو قد يساعد في فهم الجزء الموجود في مخ الجرذ المسئول عن التنقل، وهو الحصين.

(٣) سلج بوت: الروبوت المفترِس

على غرار جميع الآلات، تحتاج الروبوتات إلى طاقة. وبالنسبة إلى الروبوتات الثابتة، التي تستخدم أذرعها في التصنيع، لا تمثل الطاقة مشكلة؛ لأن الروبوت متصل بمصدر التيار الكهربائي. أما الروبوتات المتنقلة، فإنَّ توفير الطاقة مشكلة كبيرة؛ لأن الروبوتات المتنقلة تحتاج إلى حمل إمدادات الطاقة الخاصة بها معها، وهنا تظهر مشاكل في كلٍّ من حجم البطاريات ووزنها، والأهم من ذلك هو كيفية إعادة شحن تلك البطاريات عندما تنفد.

يتعقد الموقف مع الروبوتات المستقلة؛ إذ لا يمكن القول إن الروبوت مستقل حقًّا ما لم يتمتع بالاستقلالية في الحصول على الطاقة إضافةً إلى الاستقلالية في أداء المهام؛ فلا يوجد جدوى من تصميم روبوت ذكي «يتوقف عن العمل» عندما تنفد بطاريته.

فيما يتعلق بالروبوتات المتنقلة التي تعمل في المناطق المفتوحة، تتمثل إحدى الطرق الواضحة في استخدام الألواح الشمسية لشحن بطاريات الروبوت مباشرة. حينها يصبح ضوء الشمس مصدر طاقة الروبوت. وتُعتبر مركبتا المريخ الجوالتان سبيريت

وأوبورتيونيتي مثالًا مثيرًا على نجاح هذا النهج، ويمكن وصف هذه الروبوتات بأنها مستقلة حقًّا من ناحية الحصول على الطاقة.

بالرغم من ذلك، فإن الاعتماد على ضوء الشمس وحده يمكن أن يكون مشكلة في الشتاء عندما تكون الليالي طويلة (يتعين على سبيريت وأوبورتيونيتي البقاء في حالة سبات خلال فصول الشتاء على سطح المريخ)، خاصةً إذا كنا نريد أن يعمل الروبوت ليلًا ونهارًا وفي جميع الظروف الجوية. فهل يمكن للروبوتات التي تعمل في الأماكن المفتوحة (على الأرض وليس على المريخ) أن تحصل على الطاقة من خلال البحث عن الطعام أو الافتراس، مثل الحيوانات؟ في عام ١٩٩٨، في مختبر بريستول للروبوتات، بدأ مشروعٌ بحثي للتحقيق في هذا الاحتمال، وأُطلِق على أول روبوت له اسم «سلج بوت».

كان سلج بوت هو المحاولة الأولى لتصميم روبوت مفترِس: روبوت قادر على اصطياد البزاقات ثم استخدامها للحصول على الطاقة. لقد اختيرت البزاقات مصدرًا للغذاء لسببين: بطء حركتها مما يسهل (نظريًّا) اصطيادها، وأنَّ الجميع تقريبًا يعتبرونها آفات. يبحث سلج بوت، الذي صمَّمه إيان كيلي وأوين هولاند وكريس ميليش، عن فريسته، ويلتقطها بذراع طويلة خفيفة الوزن مصنوعة من ألياف الكربون. ويوجد في نهاية الذراع كاميرا/قابض متخصص الأغراض لاستشعار وجود البزاقات وتجميعها.

يسمح هذا التصميم المبتكر للروبوت بتفتيش الأرض من حوله بدقة بحثًا عن البزاقات من خلال البحث بنمط دائري حلزوني. يُثبت القابض، مع الكاميرا التي تستقر في مركزه، على ارتفاع بضعة سنتيمترات فوق الأرض في أثناء البحث، مما يعني أنه عند العثور على بزاقة، لا يتعين على الذراع سوى خفض القابض على التربة الموجودة أسفله مباشرةً للحصول على البزاقة. وعلى الروبوت المفترِس أن يكون شديد الحرص في استخدام الطاقة المستمدة من طعامه. وينعكس هذا في تصميم سلج بوت: فتحريك ذراعه المصنوعة من ألياف الكربون يستهلك طاقةً أقل بكثير من نقل جسمه؛ لذا بالمقارنة بحجمه، يمكن لسلج بوت البحث في مساحة كبيرة من الأرض عن فريسته، باستخدام الحد الأدنى من الطاقة.

إنَّ العثور على البزاقات أمرٌ صعب؛ ذلك أنَّ درجة حرارتها لا تختلف عن درجة حرارة التربة؛ ومن ثَم لا يمكننا استخدام جهاز استشعار الحرارة للعثور عليها. ولا يمكننا الاعتماد على استخدام الكاميرا للبحث عن شيء على شكل بزاقة، وإلا فإن الأحجار أو أوراق الأشجار أو قطع الخشب التي يمكن أن تكون على شكل بزاقة ستُعَد خطأً

أنها بزاقات. حل مصمِّمو سلج بوت هذه المشكلة من خلال ملاحظة أن البزاقات تعكس ضوءًا أحمر. لذلك وضعوا مصدر ضوء أحمر، بجانب الكاميرا، في راحة اليد القابضة لسلج بوت. وبناءً على هذا، يبحث برنامج معالجة الصور الخاص بالروبوت عن كُتل لزجة حمراء اللون بحجم البزاقة وشكلها.

حل سلج بوت مشكلة الافتراس (افتراس البزاقات على الأقل)، لكنه لم يتمكن من تحويل البزاقات إلى طاقة كهربائية، وهي مشكلة عالَجها خلفه: إيكو بوت.

(٤) إيكو بوت: روبوت بجهاز هضمي اصطناعي

توجد العديد من الطرق المختلفة لتحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة كهربائية. من هذه الطرق تخمير الكتلة الحيوية، وإنتاج الغاز الحيوي (الميثان)، ثم حرق الميثان في خلية وقود. وتوجد طريقة أخرى أبسط كثيرًا من حيث المفهوم، وتتمثل في استخدام خلية وقود ميكروبية. تُعَد خلية الوقود الميكروبية شبيهة بالبطارية إلى حد ما، لكنها تستخدم التفاعل الكيميائي الحيوي لتوليد الطاقة الكهربائية، بدلًا من استخدام تفاعل كيميائي.

مثل البطارية العادية تمامًا، تتكون خلية الوقود الميكروبية من قسمين: الأنود والكاثود. غير أنَّ قسم الأنود في خلايا الوقود الميكروبية التي طُوِّرت في مختبر بريستول للروبوتات، يحتوي على «حساء» سائل من الميكروبات القادرة على هضم الطعام حرفيًّا. يتكون هذا الحساء عادةً من رواسب مياه الصرف الصحي، التي يقع الاختيار عليها؛ لأنها تحتوي على مجموعة كبيرة من أنواع الميكروبات القادرة على هضم أي مادة حيوية بشكل عام، وتحليلها.

ويترتب على عملية الهضم هذه إنتاج الأيونات التي تحمل شحنة كهربائية بالطبع. إضافةً إلى ذلك، فالكاثود في خلايا الوقود الميكروبية المطورة في مختبر بريستول للروبوتات مكشوف للهواء، وهو يمتص الأكسجين؛ مما يساعد على تبادل الإلكترونات عبر غشاء يوجد بين الأنود والكاثود. وفي حالة توصيل خلية وقود ميكروبية داخل دائرة كهربائية، يتدفق تيار من الأنود إلى الكاثود، وحينها نحصل على بطارية بيولوجية تؤدي وظيفتها بالاعتماد على الطعام.

تولد خلايا الوقود الميكروبية مستويات منخفضة جدًّا من الطاقة؛ فعادةً ما توفر خلية الوقود الميكروبية الواحدة عددًا قليلًا من وحدات الميكرووات (أي أقل مما تنتجه بطارية AAA قياسية بألف مرة)، وخلال التطوير المبكر لخلايا الوقود الجرثومية بمختبر

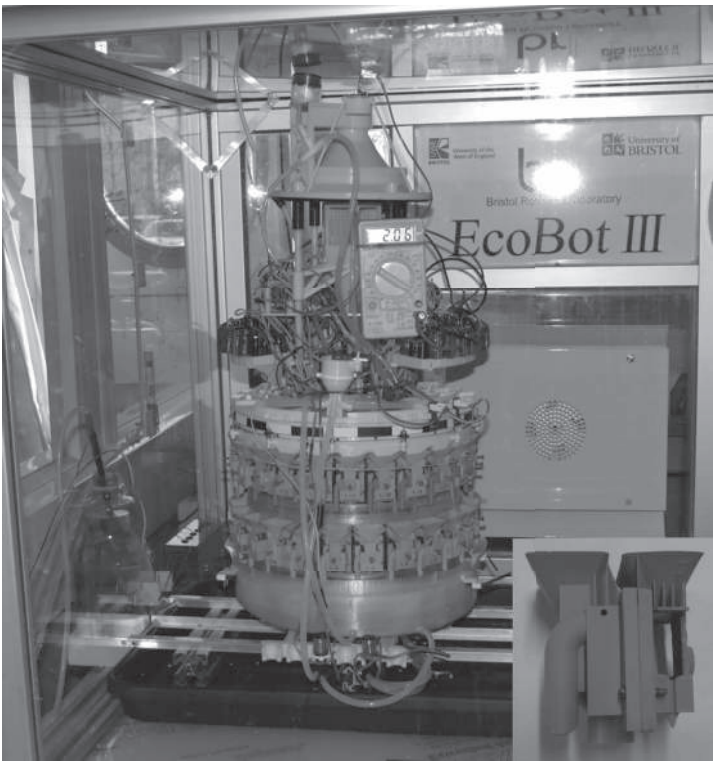
بريستول للروبوتات، اختبر الباحث يوانس يروبولس مواد غذائية مختلفة لمحاولة العثور على واحدة تنتج أفضل كفاءة للطاقة. وكانت أفضل مادة اكتشفها هي الكيتين المتعدد السكاريد، الذي يوجد عادةً في الهياكل الخارجية للحشرات. والجدير بالملاحظة أن أحد نماذج إيكو بوت الأولية استمد طاقته من ثماني ذبابات منزلية (موسكا دوميستيكا) ميتة، واحدة لكل خلية وقود ميكروبية.

إنَّ ثمانية من خلايا الوقود الميكروبية المتصلة على التوالي تولد قدرًا قليلًا جدًّا من الطاقة لا يكفي لتشغيل الروبوت بشكل مستمر؛ لذلك تُستخدم الطاقة الكهربائية التي تنتجها خلايا الوقود الميكروبية لشحن مجموعة من المكثفات الفائقة حتى يتوفر ما يكفي من الطاقة المخزنة لتشغيل الروبوت. ولهذا يعمل إيكو بوت بنمط متقطع يمرُّ فيه بفترات من التوقف عن العمل، في أثناء هضم الطعام، وفترات أقصر من النشاط المفاجئ عند استشعار بيئته، ونقل البيانات، وقيادة محركاته. وبناءً على هذا، لم يكن إيكو بوت الثاني أول روبوت في العالم يكتسب طاقته من الذباب الميت فحسب، بل ربما كان أيضًا الأبطأ على الإطلاق، حيث يتحرك بسرعة ١٣سم في الساعة. ومع ذلك، كانت الطاقة المكتسبة من ثماني ذبابات ميتة فقط تكفيه ليعمل دون توقف لمدة أسبوعين تقريبًا.

وبالرغم من اعتبار إيكو بوت الثاني إنجازًا كبيرًا، فقد كان به عيبان خطيران. العيب الواضح أنه يجب «تزويده بالطاقة» يدويًّا؛ بمعنًى آخر، يُدخَل الطعام يدويًّا في حجرات الأنود بخلايا الوقود الميكروبية الثمانية. فعلى عكس سلفه سلج بوت، لم يكن إيكو بوت الثاني قادرًا على الحصول على طعامه بنفسه. وظهرت أيضًا مشكلة ثانية، لا تقلُّ خطورةً عن العيب الأول، وهي تصميم خلايا الوقود الميكروبية لا سيما حجرة الأنود المغلقة. فهناك نُفايات تنتج عن الهضم، وفي النهاية، تسمم هذه النفايات الكائنات الدقيقة الهاضمة؛ ومن ثَم ستتوقف خلية الوقود الميكروبية عن العمل إلى حين تجديد لقاح الهضم. وقد صُمم إيكو بوت الثالث على يد يوانس يروبولس وجون جرينمان وكريس ميليش وإيان هورسفيلد للتغلب على هذين القيدين.

يتمثل أحد الابتكارات المهمة في إيكو بوت الثالث في تصميم خلية الوقود الميكروبية الفردية. وكما هو مُوضَّح في الشكل ٣-٢ (الصورة الملحَقة)، أُضيفت منافذ الإدخال والإخراج إلى حجرة الأنود كي يمكن تدوير اللقاح الميكروبي الخاص بخلية الوقود الميكروبية. وكان من المهم أيضًا أن يتقلص حجم خلية الوقود الجرثومية إلى حوالَي ١سم مكعب؛ إذ أظهرت الاختبارات أن زيادة عدد خلايا الوقود الجرثومية الأصغر حجمًا هو

أفضل طريقة لزيادة الطاقة الناتجة من الجهاز الهضمي الاصطناعي للروبوت. ومن ثَم زُوِّد إيكو بوت الثالث بثمانٍ وأربعين خليةَ وقود جرثومية توجد في حلقتين حول جسم الروبوت.



شكل ٣-٢: إيكو بوت الثالث: روبوت بجهاز هضمي اصطناعي. توضح الصورة إحدى خلايا الوقود الميكروبية

في ابتكار آخر لإيكو بوت الثالث، احتوى الروبوت على مصيدة ذباب في الجزء العلوي من الروبوت. وبنفس فكرة نبات الإبريق الآكل للحشرات، فإنَّ مزيج اللون والفيرومونات الاصطناعية يجذب الذباب لدخول المصيدة، حيث تسقط في بركة تحتوي على اللقاح الميكروبي. وفي البركة، يُهضم الذباب وينتج عنه محلول غني بالمغذيات، يُنقل بعد ذلك

عبر أنابيب إلى خلايا الوقود الميكروبية الثمانية والأربعين، حيث تكتمل عملية الهضم وتولد الطاقة لتشغيل الروبوت. وللحصول على أقصى قدر من الطاقة، يُعاد تدوير اللقاح مرتين عبر خلايا الوقود الميكروبية. تُصفَّى النفايات الصلبة من المحلول ويقوم الروبوت حرفيًّا بإخراجها في صورة فضلات. وبناءً على هذا، يُعَد إيكو بوت الثالث هو المثال الوحيد المعروف، حتى الآن، للروبوت المزوَّد بجهاز هضمي اصطناعي كامل.

تتكون بيئة الاختبار التجريبية للروبوت من خزان زجاجي مغلق يُدخل فيه الذباب الحي. يسير الروبوت على عجلات ويتحرك ذهابًا وإيابًا على طول مجموعة من القضبان القصيرة، تصل بين أحد طرفَي الخزان والطرف الآخر. يوضح هذا أن الروبوت قادر على توليد طاقة كافية للتنقل، إضافةً إلى تلك الطاقة المطلوبة لتشغيل التمثيل الغذائي الداخلي الخاص به. الحق أنَّ استقلالية الروبوت في الحصول على الطاقة تستلزم حصوله على الماء علاوةً على البروتين، وهو يستطيع جمع الماء من أنبوب في أحد طرفَيه. وفي حالة وجود إمداد مستمر من الماء والبروتين في الخزان (على شكل ذباب)، فإنَّ الروبوت يكون قادرًا، من الناحية النظرية، على مواصلة العمل دون توقف (على عكس أسلافه من روبوتات الإيكو بوت).

أرى أن إيكو بوت الثالث مهم لعدة أسباب. أولها أنه يقدم إثباتًا لمفهوم الروبوتات المستقلة من ناحية الطاقة التي تجمع طعامها وتهضمه للحصول على الطاقة، وأنه يستطيع القيام بذلك مع توليد ما يكفي من الطاقة الفائضة لأداء مهامه. وثاني هذه الأسباب أنَّ إيكو بوت الثالث يجسد التطبيق الجديد لأساليب التصميم والتصنيع، وذلك بالاستفادة المكثفة من الطباعة الثلاثية الأبعاد للأشكال والهياكل البلاستيكية المعقدة (التي تدمج بعض أنابيب الروبوت، على سبيل المثال). أما السبب الثالث، فهو أنَّ الروبوت يجسد تعاونًا متعدد التخصصات بين علم الروبوتات والكيمياء الحيوية. وعلى الرغم من أنه قد يُعَد أحد الروبوتات المستوحاة من الأحياء بشكل كبير (من نبات الإبريق)، يمكن حقًّا وصف إيكو بوت الثالث بأنه روبوت حيوي.

ما التطبيقات المحتملة لتقنية إيكو بوت؟ يمكن للمرء أن يتخيل، على سبيل المثال، روبوتًا بستانيًّا قادرًا على تحديد الحشائش والآفات الكبيرة (مثل البزاقات) والتقاطها بشكل انتقائي، لتزويد نفسه بالطاقة بما يجمعه، ثم يخرج نفاياته في صورة سماد. مثل هذا الروبوت سوف «يعيش» فعليًّا في حديقتك، ويؤدي عمله بهدوء واستقلالية. في مجالَي البستنة والزراعة، يمكن للمرء أن يتخيل مجموعات من هذه الروبوتات ذاتية التنظيم (انظر أسراب الروبوتات في الفصل الخامس) تعمل بشكل جماعي — وعضوي (نظرًا

لعدم وجود مبيدات أعشاب أو مبيدات حشرية) — لمكافحة الحشائش والآفات في الحقول والصُّوَب الزراعية.

(٥) سكراتش بوت: نهج المحاكاة الحيوية لاستشعار العالم

تستخدم العديد من الحيوانات اللمس النشط لاستشعار بيئتها. وتُعتبر قرون استشعار الحشرات وشوارب الثدييات أمثلة على ما يُسمى بأنظمة استشعار اللمس النشط أو المستشعرات الميكانيكية. إنَّ شوارب القوارض على وجه التحديد مثيرة للاهتمام؛ إذ إنها تتحرك فعليًّا للخلف وللأمام، وتجمع معلومات عن الأجسام التي تقع ضمن نطاقها وشكلها وملمسها.

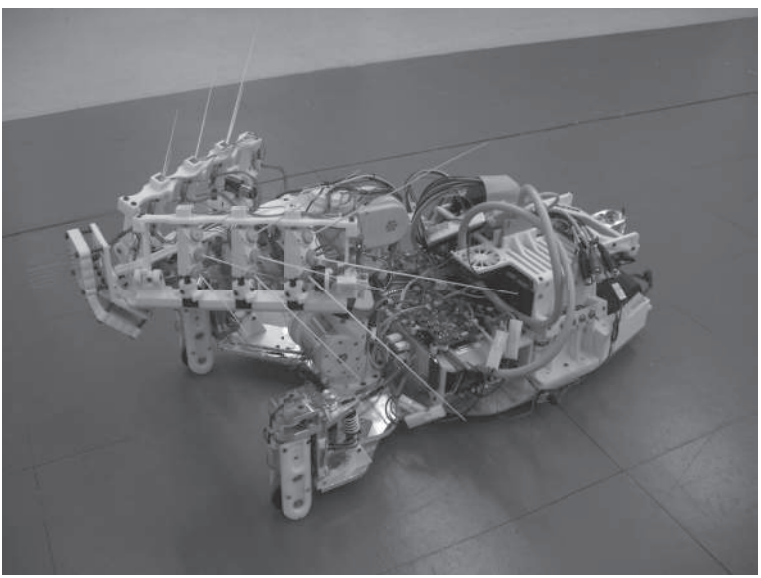
الفئران، على سبيل المثال، ترى في الظلام بشكل ثلاثي الأبعاد وتشعر بالملمس، باستخدام شواربها، وقد قدَّر علماء الأعصاب أن نسبة القشرة الدماغية التي تستخدمها الفئران في معالجة البيانات القادمة من شواربها أكبر من تلك التي تستخدمها لمعالجة البيانات القادمة من نظام الرؤية الخاص بها. ولا يبدو أنَّ هناك قدرًا كبيرًا من الشك في أن الإحساس المهيمن لدى الفأر هو اللمس النشط باستخدام شواربه.

بالنسبة إلى الروبوتات، تُعَد الشوارب الاصطناعية أجهزة استشعار في غاية الجاذبية. تخيل روبوتات بحث وإنقاذ صغيرة مصمَّمة لدخول المباني المنهارة للتفتيش داخل المبنى. من المحتمل أن تكون هذه الأماكن مظلمة، ومن المحتمل جدًّا أن يكون الهواء بها مليئًا بالغبار أو الدخان. ولهذا، فإن مستشعرات الروبوت التقليدية المعتمدة على الضوء، مثل أنظمة الرؤية المعتمدة على الكاميرا أو جهاز الكشف عن الضوء وتحديد المدى المعتمد على الليزر، ستكون عديمة الفائدة بشكل كبير.

قد توفر الشوارب الاصطناعية، من حيث المبدأ، أفضل شكل من أجهزة الاستشعار لتمكين الروبوت من التنقل والبحث في مثل هذه الأماكن الضيقة والخطيرة. ففي مثل هذه البيئة، سيتعين على الروبوت أن يتحرك بحذر، وسوف تساعد الشوارب الاصطناعية بلمستها الناعمة أن تقلل من خطر تسبب الروبوت نفسه في أي انهيار آخر.

صُمم سكراتش بوت الخاص بمختبر بريستول للروبوتات (انظر الشكل ٣-٣) ليكون بمثابة جهاز اختبار للشوارب الاصطناعية. ففي إطار مشروع «بيوتاكت»، وبقيادة عالم الأعصاب الإدراكي توني بريسكوت، صمم كلٌّ من مارتن بيرسون وتوني بايب وجيسون ويلسبي، سكراتش بوت الذي يبلغ حجمه ضعف حجم الجرذ، ويحتوي «رأسه» على

مجموعتين من الشوارب الكبيرة، تصطف على كلا الجانبين. تتراص هذه الشوارب، التي تمثل الشوارب الكبيرة (الشعيرات الكبيرة) لدى لفئران، في ثلاثة صفوف يحتوي كلٌّ منها على ثلاثة شوارب. غير أنَّ الجرذ الحقيقي لديه أكثر من ثمانية عشر شاربًا من هذا النوع. وتسمح المحركات لجميع شعيرات الروبوت الكبيرة البالغ عددها ثمانية عشر بالتحرك للخلف وللأمام؛ مما يوفر دائرة استشعار يبلغ نصف قُطرها حوالَي ٢٠ سم، ويبلغ قوسها حوالَي ٦٠ درجة، وذلك على جانبَي رأس الروبوت.



شكل ٣-٣: سكراتش بوت، روبوت بشوارب اصطناعية

يبلغ طول كل شارب اصطناعي نحو ٢٠ سنتيمترًا، مع مقطع عرضي دائري يتناقص قُطره من ٢ ملِّيمتر عند القاعدة إلى ٠,٦ ملِّيمتر عند الطرف، وهي مصنوعة بالطباعة الثلاثية الأبعاد من مادة بلاستيكية تمنح الشوارب قوة وخفة ومرونة. تُثبت قاعدة الشارب الاصطناعي بقوة في جذر يُدمج فيه مستشعر يعمل بخاصية تأثير هول ذو محورَين. يولد هذا المستشعر، المناظر للمستقبلات الميكانيكية في بُصيلة الشارب الحقيقي، إشارات كهربائية تتناسب مع مقدار انثناء الشارب واتجاهه.

وفي الجزء الأمامي من رأس الروبوت، توجد مجموعة أخرى من الشوارب الاصطناعية مرتَّبة في أربعة صفوف يوجد بكلٍّ منها أربعة شوارب. هذه الشوارب القصيرة ثابتة (أي إنها لا تتحرك فعليًّا)، وهي تمثل شوارب الفئران الصغيرة (الشعيرات الدقيقة). يُعتقد أن الجرذ يستخدم شعيراته الكبيرة أولًا ليحدد موقع الأشياء داخل نطاق «اللمس» الخاص به، ثم يدير رأسه بما يمكنه من وضع الشعيرات الدقيقة على الجسم لفحصه بدقة أكبر؛ ومن ثَم فإن الشعيرات الدقيقة تعمل بمثابة حاسة اللمس المكافئة للمنطقة النقيرية بالعين. ويحاكي سكراتش بوت هذا السلوك. فهو يبحث في إحدى المناطق باستخدام الشعيرات الاصطناعية الكبيرة المتحركة، وعندما يعثر الروبوت على شيء ما، حينها سيدير رأسه، باستخدام رقبته المفصلية، لـ «تركيز» شعيراته الدقيقة على الشيء.

كيف يفهم سكراتش بوت الإشارات الصادرة من شواربه الاصطناعية؟ على الرغم من أن سكراتش بوت يحتوي على شوارب أقل بكثير من نظيره الحي؛ فمع وجود أربعة وثلاثين شاربًا، يوجد قدر كبير من البيانات التي تولَّد ديناميكيًّا عند مواجهة جسم ما. وليس من السهل على الإطلاق تحويل تلك البيانات إلى موضع الجسم واتجاهه (بالنسبة إلى جسم سكراتش بوت) أو حتى شكله وملمسه.

لا يولد الشارب الاصطناعي أي إشارة على الإطلاق عندما يكون ثابتًا. وتولَّد البيانات عندما يتلامس الشارب مع الجسم، ويمكن استخدام طبيعة البيانات التي تولَّد في أثناء خدش الشارب لسطح الجسم لاستنتاج ملمسه: فالملمس الخشن، على سبيل المثال، سيولد إشارة مختلفة عن الملمس الناعم (مثلما أنك لا تستطيع معرفة ما إذا كان السطح خشنًا أم ناعمًا عن طريق وضع إصبعك فحسب على السطح؛ فأنت تحتاج في الواقع إلى تحريك إصبعك على السطح).

عندما تتحرك جميع الشوارب في مصفوفة الشعيرات الكبيرة نحو جسم واحد، يمكن استخدام التوقيت النسبي للإشارات التي تولدها الشوارب في حالة وجود ترابط بينها وبين الموقع النسبي للشوارب التي تولد تلك الإشارات، لاستنتاج موقع خواص الجسم، خاصةً الزوايا والحواف، في مكان ثلاثي الأبعاد.

اتخذ مصمِّمو سكراتش بوت نهجًا مختلفًا في المحاكاة الحيوية للطريقة التي يعالج بها الروبوت البيانات الناتجة عن شواربه الاصطناعية. يمتلك الروبوت نموذجًا إلكترونيًّا لجزء صغير جدًّا من مخ الجرذ: الجزء الذي يقوم بالمعالجة المسبقة للنبضات العصبية القادمة من الشوارب. وباستخدام تقنية «مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة في الموقع»،

ينفذ الروبوت نموذجًا عالي الدقة من الشبكة العصبية الاصطناعية المتصاعدة لجزء من جذع دماغ الجرذ، يُطلق عليه اسم المجمع الحسي الثلاثي التوائم. وبصفة مبدئية، تعالج مصفوفة البوابات القابلة للبرمجة في الموقع إشارات الشوارب باستخدام نحو ٤٠ ألف خلية عصبية اصطناعية وهيكل التواصل ذاته.

بناءً على هذا، يوفر لنا سكراتش بوت مثالًا جيدًا على نهج محاكاة حيوية قوي لتصميم الروبوتات. فهو يوضح أنَّ علم الروبوتات قد أصبح الآن مسعًى متعدد التخصصات، وهو يجمع في هذه الحالة بين علماء الروبوتات وعلماء السلوك الحيواني وعلماء الأعصاب. ويعد الروبوت نموذجًا عمليًّا لاختبار فرضيات علمية، وهي في هذه الحالة فرضيات عن كيفية عمل بعض أنظمة التحكم في مخ الجرذ، بينما يوفر في الوقت ذاته منصة اختبار لتطوير تقنية استشعار جديدة للروبوتات. ولا شك أنَّ الشوارب الاصطناعية من النوع الموجود في سكراتش بوت إضافة قوية لمجموعة المستشعرات المتاحة لمصمِّمي الروبوتات.

(٦) الروبوتات القابلة للتعلم

من الجلي أنَّ التعلم عنصر مهم وفعَّال لأي كائن، سواء أكان حيوانًا أم روبوتًا، فليس من المستغرَب أن يبحث علماء الروبوتات في مناهج تعلم الروبوتات لسنوات عديدة. غير أنَّ القليل فقط من الروبوتات الموجودة بالفعل قادرة على التعلم أو تكييف سلوكياتها. ويعبر هذا عن أمرين: أن تعلم الروبوتات لم يزل تحديًا بحثيًّا كبيرًا، وأن الروبوتات القادرة على التعلم تثير مشكلةً ذات طبيعة خاصة عندما يتعلق الأمر بالتصديق على سلامة الروبوت. فكيف يمكننا الإقرار بأن الروبوت سيفعل الشيء الصحيح دائمًا إذا كنا لا نعرف ماهية السلوكيات التي قد يتعلمها في المستقبل؟

بالرغم من ذلك، فإنَّ تعلم الروبوتات أمر مهم، وفيما يأتي سألخِّص المناهج الرئيسية في هذا المجال.

يُعرف النهج الأول لتعلم الروبوتات، وهو النهج الأكثر قوة ونجاحًا بلا شك (والذي يعتبره البعض أحد أعظم الإنجازات في علم الروبوتات حتى الآن)، باسم «تحديد المواقع ورسم الخرائط في آن واحد». فتحديد المواقع يمثل مشكلة رئيسية في الروبوتات المتنقلة؛ أي كيف يعرف الروبوت موقعه من مكان ثنائي أو ثلاثي الأبعاد؟

وإذا كان الروبوت طائرًا أو متنقلًا على الأرض في الأماكن المفتوحة، فإن نظام تحديد المواقع العالمي يوفر حلًّا جاهزًا. وإذا كان روبوتًا يعمل في الأماكن المغلقة، مثل روبوت

شركة أيثون لنقل المعدات في المستشفيات: «تَج»، الذي وصفته في الفصل الثاني، وكان الروبوت مزودًا بخريطة إلكترونية، فسيصبح تحديد المواقع حينها أمرًا بسيطًا نسبيًّا.

بالرغم من ذلك، ففيما يتعلق بالروبوتات غير المزوَّدة بنظام تحديد المواقع العالمي (أو ما شابه) ولا هي مزوَّدة بخريطة، يوفر «تحديد المواقع ورسم الخرائط في آن واحد» تقنية لرسم خريطة (لما يراه الروبوت بأجهزة استشعاره) مع التوصل إلى تقدير تقريبي لموقعه من تلك الخريطة في الوقت ذاته. وفي أثناء تنقل الروبوت في بيئته، تتحسن الخريطة ومستوى ثقة الروبوت في موقعه بالنسبة إلى الأجسام الموجودة في تلك الخريطة.

ثَمة نوع آخر من تعلم الروبوتات عام بدرجة أكبر، ويُسمى بالتعلم المعزز. وهو مستوحًى بالطبع من علم الأحياء؛ لأنه نوع من التعلم المشروط. إذا كان الروبوت قادرًا على تجربة العديد من السلوكيات المختلفة، واختبار نجاح كل سلوك أو فشله، ثم «تعزيز» السلوكيات الناجحة، حينها يُقال إنه يتمتع بتعلم معزز. وعلى الرغم من أنه هذا يبدو بسيطًا من حيث المبدأ، فهو ليس كذلك فعليًّا. فهو يفترض، أولًا، أن قائمة السلوكيات التي سيُجرِّبها الروبوت بها سلوك واحد ناجح على الأقل، وثانيًا أنه يستطيع اختبار فائدة كل سلوك؛ أي أن يكون للسلوك فائدة فورية يمكن قياسها. وإذا كان على الروبوت أن يجرب كل سلوك ممكن أو إذا تأخرت الفائدة، فإن هذا النوع من التعلم الفردي «غير الخاضع للإشراف» يكون بطيئًا للغاية.

ثَمة نوع آخر من التعلم المستوحى من علم الأحياء، لا سيما التعلم الاجتماعي لدى البشر، وهو النهج الثالث لتعلم الروبوتات الذي يُعرف باسم «برمجة الروبوتات بالمثال». في الفصل الثاني، شرحت كيف يمكن للمستخدم برمجة ذراع روبوت لينفذ سلسلة من الحركات المطلوبة باستخدام لوحة تحكم تسمح للإنسان بالتحكم في ذراع الروبوت وقيادته بالفعل «يدويًّا»؛ ومن ثَم «تعليم» الروبوت. ويمثل هذا شكلًا بسيطًا جدًّا من البرمجة بالمثال، لكن السنوات الأخيرة شهدت تحول التركيز إلى التعلم عن طريق المحاكاة.

يُعَد التعلم عن طريق المحاكاة مناسبًا بشكل خاص للروبوتات التي تشبه البشر، وهو في جوهره على مراقبة الروبوت للإنسان في أثناء تأدية مهمة. بعد ذلك، يحاول الروبوت نسخ الحركات والأفعال ذاتها. وتُعَد برمجة هذا الشكل من التعلم بالمحاكاة أمرًا معقدًا، وتتطلب حلًّا لما يُسمى بمشكلة التطابق: حيث يتعين على الروبوت تحويل ما «يراه» بكاميراته إلى سلسلة مطابقة من الأفعال الحركية.

إن الأساليب الثلاثة التي أشرت إليها بالأعلى كلها طرق لتعلم روبوت فردي مهمة أو مهارة. أما في الطبيعة، فلا تتعلم معظم الحيوانات البسيطة فرديًّا، بل تولد بمجموعة

من التصرفات اللاإرادية المحددة وراثيًّا. بالرغم من ذلك، فقد تكيَّفت هذه السلوكيات عبر الأجيال المتعاقبة، من خلال الانتخاب الطبيعي. ثَمة نوع رابع من التعلم في الروبوتات، مستوحًى من نظرية التطور لداروين، يطلق عليه أحيانًا اسم «التعلم التطوري»؛ لأنه يحدث عبر أجيال متعددة من الروبوتات. ويرد وصف هذا النهج في الفصل الخامس.

ليست الروبوتات الحيوية بأحد أوهام فرانكشتاين لتصميم «آلات حية». فعلى النقيض من ذلك، يُضفي التغيير الجذري الذي ذكرته في هذا الفصل إحساسًا أعمق بالتواضع والاحترام أمام التعقيد البديع لـ «التصاميم» المتطورة التي نراها في الطبيعة. فأفضل جهودنا لإنشاء نماذج اصطناعية لهذه التصاميم محدودة بشكل يُرثى له، وهي توضح الفجوة بين أكثر الروبوتات الذكية تعقيدًا وأبسط الحيوانات.

الفصل الرابع

الروبوتات التي تشبه البشر والروبوتات البشرية

على الرغم من أن الغالبية العظمى من الروبوتات في العالم اليوم — بما في ذلك تلك الموجودة في مختبرات الأبحاث — لا تشبه البشر، فإن الروبوتات المصمَّمة على شاكلتنا لها سحر خاص. ربما لا يكون هذا مفاجئًا إذا عرفنا أنَّ كلمة «روبوت» استُخدمَت لأول مرة لوصف إنسان آلي خيالي. وبعيدًا حتى عن الخيال، ثَمة أسباب وجيهة لكي تكون الروبوتات التي تعمل مع البشر شبيهة بهم: كي تتمكن من استخدام أدوات البشر والمشاركة في أماكن عملهم، ولكي تكون قادرة على التواصل معهم بشكل طبيعي (من خلال الكلام وتعبيرات الوجه والإيماءات، على سبيل المثال).

يُوصف الروبوت بأنه شبيه بالبشر إذا كان له شكل أو هيكل يحاكي الشكل البشري إلى حد ما. وبناءً على هذا، فإن رأس الروبوت المثبت فوق جذع وبه مستشعران للرؤية مكان العينين، يُعتبر شبيهًا للإنسان. وإذا كان لدى الروبوت ذراعان، فيجب أيضًا أن يكونا شبيهين بذراعَي البشر؛ أي أن يكونا مثبَّتَين على كتفَي الجذع، ومزوَّدين بيدين أو قابضين يشبهان اليدين.

ولكي يُطلَق على الروبوت أنه يشبه البشر، يحظى شكله بأهمية أكبر مما تحظى بها تفاصيل مكوناته. إذا كان له أرجل، على سبيل المثال، فيجب أن يكونا اثنين ومزوَّدين بما يشبه مفصل الورك ومفصل الركبة ومفصل الكاحل، حتى وإن كانت الساقان لا تتشابهان بقدر كبير من الناحية التشريحية مع نظيراتها البشرية. ولا شك أنَّ معظم الروبوتات التي تشبه البشر تتمتع بمظهر ميكانيكي، وإذا صُممت من مكونات بلاستيكية، فقد تبدو أشبه بشخصيات كرتونية أو تعطي انطباعات كرتونية لما يجب أن تبدو عليه الروبوتات.

بالرغم من ذلك، توجد مجموعة فرعية صغيرة من الروبوتات تشبه البشر في التركيب والمظهر بدقة أكبر، ويُشار إلى هذه الروبوتات باسم android (أندرويد). وهي تتمتع

بجلد اصطناعي وشعر ومستحضرات تجميل وملابس؛ أي تُعتبر، في واقع الأمر، تماثيل عرض. لكن على غرار العديد من روبوتات الخيال العلمي، إذا أزلت جلدها الاصطناعي، فستجد تحته لوحات دوائر الروبوت ومحركاته. لكن هذه الروبوتات حقيقية، فكثيرون يعدونها أقرب ما يأمل علم الروبوتات في تحقيقه، وهو: الأشخاص الاصطناعيون. ولسوء الحظ (أو ربما لحسنه، حسب وجهة نظرك)، تُعتبر الروبوتات البشرية اليوم بعيدةً كل البعد عن هذا الحلم، وإن كان مظهرها باهرًا.

تكمن المشكلة باختصار في أننا قادرون على تصميم الأجسام وليس العقول. وسنجد أنَّ موضوع تخلف تقنية ذكاء الروبوتات عن ميكانيكا إلكترونيات الروبوتات يتكرر على مدار هذا الكتاب، لكن هذا التباين بين الاثنين يتجلى بأوضح صورة في الروبوتات البشرية. وتكمن المشكلة في أنه إذا كان الروبوت يبدو بشريًّا بشكل مقنع، فإننا (منطقيًّا) نتوقع منه أن يتصرف على أنه إنسان. ولهذا السبب، فإنَّ الروبوتات البشرية التي تتمتع بجسد إنسان كامل لا تزال مخيِّبة للآمال، وقت كتابة هذا الكتاب.

وعلى الرغم من أن الروبوتات الشبيهة بالبشر من الموضوعات المثيرة في مجالات البحث والتطوير، فإنها تنطوي على تحديات تقنية خاصة، وليس من المستغرَب أنَّ قِلة منها فقط هي التي تُستخدم الآن بالفعل. ربما كان أول استخدام جاد للروبوت الذي يشبه البشر بوصفه روبوتًا مساعدًا هو الروبوت روبونوت الذي صمَّمته ناسا وجنرال موتورز، ووُضع مؤخرًا في محطة الفضاء الدولية. يتكون هذا الروبوت من جذع يشبه الجزء العلوي من جسم الإنسان وفي نفس حجمه، ولديه ذراعان ويدان ماهرتان، ورأس شبيه إلى حد ما بخوذة سائق سيارات سباق.

تنتمي الغالبية العظمى من الروبوتات التي تشبه البشر إلى فئة الألعاب (مثل روبوسيبيان من واوي)، أو فئة الروبوتات التعليمية (مثل الروبوت ناو من ألديباران روبوتكس)، أو كعارض للتكنولوجيا (مثل أسيمو الخاص بشركة هوندا). ومن الأمور التي تحظى بأهمية خاصة الاستخدام المتزايد للروبوتات الشبيهة بالبشر في رياضات الروبوتات التي تتضمن تنافس الروبوتات في المسابقات الفردية (مثل: سباقات الماراثون أو رفع الأثقال)، أو في المسابقات الجماعية مثل كرة قدم الروبوتات. وتقدم لعبة كرة قدم الروبوتات تحديًا رائعًا، وتسلط الضوء على تطور الروبوتات، كما أن الروبوتات غير الاحترافية الصغيرة الحجم والشبيهة بالبشر غير مكلفة بشكل كبير؛ لذا يمكن لفرق المدارس أو الطلاب المشاركة بها في مثل هذه المسابقات. فمن الرائع مشاهدة فريقين من

الروبوتات الشبيهة بالبشر يتنافسان في ملعب كرة قدم. غير أننا نجد بعضًا من الروبوتات الشبيهة بالبشر الأكثر إثارة للاهتمام في مختبرات الأبحاث، وسأصف عددًا منها في هذا الفصل.

من المهم ألا نبالغ في أهمية الروبوتات الشبيهة بالبشر. فلا شك أنه توجد العديد من التطبيقات المحتملة للروبوتات في أماكن عمل البشر أو معيشتهم قد يكون من الأفضل أن تُقدِّمها روبوتات لا تشبه البشر. فحجة استخدام الروبوت الشبيه بالبشر لأدوات البشر لا معنى لها إذا كان من الممكن القيام بالمهمة بشكل مستقل. فسيكون من السخف، على سبيل المثال، تصميم روبوت يشبه البشر لتشغيل مكنسة كهربائية مصمَّمة للبشر. وبالمثل أيضًا، إذا كنا نريد سيارة من دون سائق، فليس من المنطقي تصميم روبوت يشبه البشر ليجلس في مقعد السائق. يبدو إذَن أن حجة الروبوتات التي تشبه البشر تكون في أقوى حالاتها فيما يتعلق بالروبوتات التي ينبغي أن تعمل مع البشر أو تتعلم منهم أو تتفاعل معهم من كثَب.

(١) تطبيقات الروبوتات الشبيهة بالبشر: الروبوتات المساعدة في أماكن العمل

أحد الأسباب الأكثر إقناعًا لضرورة أن تكون الروبوتات شبيهة بالبشر هي تلك التطبيقات التي تتفاعل فيها الروبوتات مع البشر، وتعمل في أماكن عملهم، وتستخدم أدوات أو أجهزة مصمَّمة لهم. تخيل، على سبيل المثال، أن يكون لديك زميل عمل روبوت. وأنت تعمل على إصلاح بعض الآلات المعقدة، وتتطلب تلك الإصلاحات اهتمامك الكامل. لكنك بحاجة إلى أداة؛ لذا تمدُّ يدك، ودون أن تدير رأسك تقول «هل يمكنني الحصول على مفتاح ربط مقاس ١٥ ملِّيمترًا من فضلك؟» فلكَي يكون زميلك الروبوت مفيدًا، يجب أن يكون قادرًا على فهم طلبك المنطوق وإيماءتك؛ أي يحتاج الروبوت أن يعرف على وجه التحديد أنك تطلب منه ضمنيًّا أن يضع مفتاح الربط مقاس ١٥ ملِّيمترًا في يدك — برفق — ثم يترك مفتاح الربط فور أن تمسكه. وفي البيئات الصاخبة، يزداد الاعتماد على الإيماءات والألفاظ غير اللغوية مثل «أها!»

ليس من الضروري بالطبع أن يكون الروبوت الذي يمكنه فهم لغتك اللفظية والإيمائية شبيهًا بالبشر، لكن الهيئة البشرية ستساعده على أن يكون قادرًا على تحديد مكان مفتاح الربط في صندوق الأدوات أو على رف الأدوات المصمَّم للبشر والإمساك به فعليًّا. غير أنه توجد أسباب أقوى من ذلك. إذا كانت البنية الجسدية للروبوت شبيهة

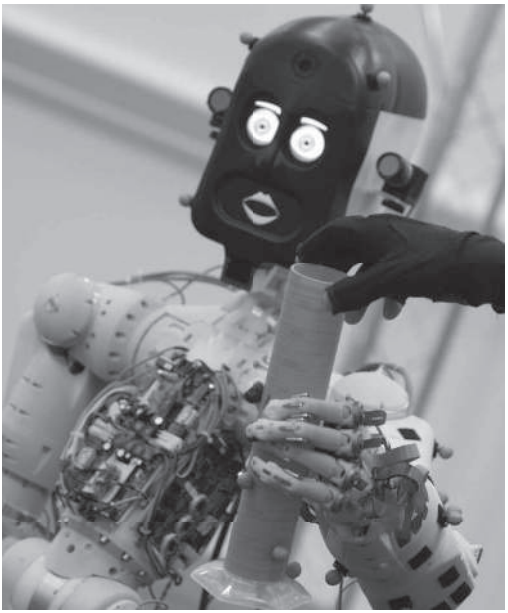
بأجسامنا؛ ومن ثَم فهو مُجبَر على التحرك بنفس الطريقة التي نتحرك بها، ويرى العالم أو يسمعه من منظور مشابه لمنظورنا، فسيكون من الأرجح أن يستطيع تعلم طرقنا في التعامل وطبيعة أماكن العمل الخاصة بنا.

يزودنا الروبوت بيرت (انظر الشكل ٤-١) بدراسة حالة لروبوت مصمم للبحث في مجال التفاعل التعاوني بين الإنسان والروبوت الذي يمكن أن يؤدي في نهاية الأمر إلى تطوير الروبوت المساعد في مكان العمل، والذي نعرض تصورنا له هنا. وقد طُورت قدرة بيرت على التفاعل مع البشر على يد علماء الروبوتات كريس ميليش، وتوني بايب، وأليكس لينز، وسيرجي سكاتشيك، وكان ذلك جزءًا من مشروع «كريس» الذي يُجريه مختبر بريستول للروبوتات.

وصمَّمت شركة الروبوتات إيلوموشن، بيرت الثاني، وهو روبوت ثابت، لكن افتقاره إلى التنقل المستقل يعكس وظيفته بصفته منصة للبحث في مجال تفاعل الإنسان والروبوت عن قرب. وبصفة مبدئية، لا يوجد سبب يمنع بيرت، أو سليلًا له، من المشي على أرجل أو التدحرج على عجلات. يبلغ ارتفاع بيرت من الخصر إلى أعلى الرأس حوالَي ١,١ متر. وله جذع غير متحرك؛ أي إن ظهره صلب وثابت. ويبلغ طول ذراعَي بيرت حوالَي ٧٥ سنتيمترًا من الكتف إلى أطراف الأصابع، وبهما مفاصل للكتف والكوع والرسغ توفر لبيرت محاكاة مقنعة لنطاق حركات يدَي الإنسان وذراعيه وإن كانت غير دقيقة من الناحية التشريحية، والأهم من ذلك أنها توفر له القدرة على القيام بإيماءات الذراع التعبيرية.

للأيدي أهمية خاصة في تواصل البشر بالإيماءات؛ فكر في المعنى الخاص لقبضة مضمومة بإحكام، أو المعنى المختلف تمامًا ليد مضمومة مع مد إصبع السبابة، أو راحة يد مفتوحة لإلقاء التحية، أو يد ثابتة وذراعها ممتد بصرامة للإشارة إلى «التوقف». ولا شك أن يدَي بيرت القادرتين على فعل كل هذه الإيماءات، وأكثر من ذلك، إنجاز استثنائي. فهاتان اليدان الاصطناعيتان مثال رائع على فن تصميم الروبوتات التي تشبه البشر لتميزها بحجم يدَي شخص بالغ كبير. إن يدَي بيرت قادرتان على القيام بمعظم حركات اليد الطبيعية؛ لأنهما تعملان بالكهرباء، ويتضمَّنان جميع المحركات حتى لا تكون هناك حاجة إلى أي محركات مساعدة أو عضلات اصطناعية في الساعد، أو مفصل رسغ معقد مزود بأوتار.

ولما كانت ذراعا بيرت ويداه شبيهة بنظيرتها البشرية إلى حد كبير، فمن الطبيعي أن تكون مصمَّمة للاستخدام كأجهزة تعويضية للبشر وللروبوتات أيضًا. ويوضح هذا إمكانية تحقيق فوائد متبادلة بين تكنولوجيا الروبوتات البشرية والأطراف الاصطناعية،



شكل ٤-١: جذع بيرت الثاني مزوَّد برأس رقمي من مختبر بريستول للروبوتات، وهو يمثل الجزء العلوي من جسم روبوت بشري مخصَّص للبحث في مجال التعاون بين الإنسان والروبوت

وينطبق هذا بشكل خاص على الذراعين واليدين. توجد العديد من القواسم المشتركة بين متطلبات قدرة المحركات والمفاصل الفردية على محاكاة حركات الإنسان الطبيعية وقدراته، وانخفاض وزنها، وانخفاض متطلباتها للطاقة، وموثوقيتها، واتسامها بالتحكم المدمج المنخفض المستوى.

لنُلقِ الآن نظرة على الرأس الرقمي لبيرت. إنه هيكل بلاستيكي ثلاثي الأبعاد يتميز بسمات جسدية تقريبية للغاية. توجد بالرأس الرقمي شاشة إل سي دي مسطحة مُدمَجة فيه، ويظهر الفم والعينان والحاجبان في شكل رسومات بالكمبيوتر على الشاشة المسطحة. وبهذا أمكن تحقيق وجه بيرت «الكارتوني» الذي لا يزال يسمح بحدوث مجموعة كبيرة من تعابير الوجه الثابتة والمتحركة بالرغم من عدم احتوائه على أجزاء متحركة ميكانيكية على الإطلاق. بالرغم من هذا، لا يمكن لرأس بيرت إظهار تعبيرات الوجه العالية الدقة

ذات الفروق الطفيفة، التي تتميز بها رءوس الروبوتات البشرية التي سأصفها لاحقًا في هذا الفصل. غير أنني أعتقد أن النهج المستخدَم في الروبوت بيرت يوفر تعابير وجه كافية لمجموعة واسعة جدًّا من التطبيقات المحتملة للروبوتات الفعلية التي تشبه البشر وتتطلب وجوهًا اصطناعية.

تحتاج الروبوتات الشبيهة بالبشر إلى الوجوه لسببَين. السبب الأول أننا، نحن البشر، نركز اهتمامنا بشكل غريزي على رأس الروبوت وعينيه (حتى عندما تكون العينان لا تعمل)، وقد نجد الوجه الخالي تمامًا من الملامح أو عدم وجود رأس على الإطلاق أمرًا مقلقًا. والسبب الثاني أنَّ وجود الرأس والوجه قد يكون طريقة بسيطة لكنها قوية بشكل مدهش وطبيعية لتقديم الملاحظات للإنسان الذي يتفاعل مع الروبوت. إذا خاطبت روبوتًا بالكلمات ووجَّه عينيه نحوك، على سبيل المثال (حتى لو كانت عينين كارتونيتين بسيطتين مثل عينَي بيرت)، حينها تحصل على تأكيد فوري أن الروبوت قد سمعك ويشرع في خدمتك.

يوفر الاهتمام المتبادل من خلال نظرات العين مثالًا جيدًا آخر: إذا كنت تعمل أنت والروبوت على مهمة مشتركة، فسوف تنظر تلقائيًّا (ودون وعي) إلى أي جسم في مساحة العمل المشتركة. وإذا كان الروبوت يتتبع نظراتك، فيمكنه عندئذٍ تركيز مستشعراته على الجسم ذاته، حينها تكوِّن أنت والروبوت اهتمامًا مشتركًا؛ ويمكنك التأكد من ذلك عند رؤية توجُّه عينَي الروبوت إلى الجسم ذاته.

(٢) نحو تطوير روبوتات رفيقة: الروبوتات التي يمكننا التواصل معها

نتمتع، نحن البشر، بنزعة عميقة الجذور لإضفاء الصفات البشرية للأشياء غير البشرية. فنحن نجد سهولة كبيرة في إضفاء الخصائص البشرية على الحيوانات ووصف أي شيء يتحرك بكلمات متأصلة في المشاعر البشرية، بل إننا لا نستطيع التوقف عن فعل ذلك. وحتى إذا كان الروبوت لا يشبه البشر على الإطلاق — مثل إي-باك الذي ورد ذكره في الفصل الأول — فسيُوصف، على سبيل المثال، بأنه «ضعيف» إذا كان يتحرك بشكل غريب مقارنةً بزملائه في الفريق، أو بأنه «عدواني» إذا كان الروبوت يقترب باستمرار من الآخرين بحركات سريعة مفاجئة. وبصفتي عالم روبوتات، فقد تعلمت أن أُولِيَ انتباهي عندما يستخدم الحضور لغةً كهذه؛ لأنها تشير دائمًا إلى وجود خطب ما في تلك الروبوتات: عطل ميكانيكي في المحرك أو علبة التروس، على سبيل المثال، يجعل الروبوت يعرج.

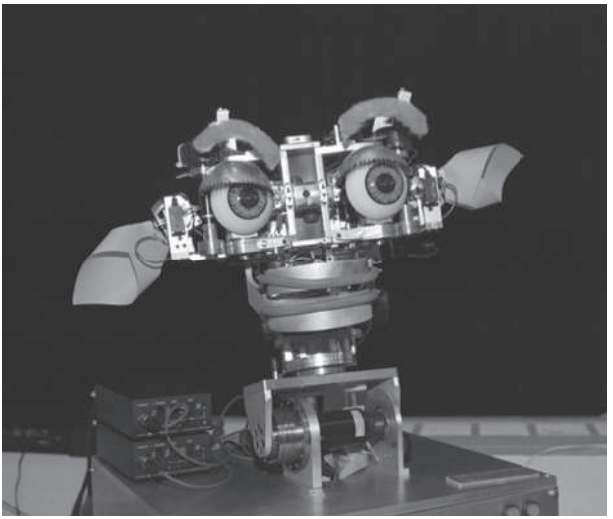
إن هذا الميل إلى إضفاء الصفات البشرية يعني أن علماء الروبوتات لا يحتاجون في الواقع إلى العمل جاهدين لتصميم روبوتات تتصرف «كما لو» كان لديها مشاعر. فليس من الضروري أن تكون الروبوتات بشرية بدقة عالية لتحقيق هذه الغاية. وقد وُجد أن وجوه الروبوتات البسيطة التي تشبه البشر وتتميز بخصائص شبيهة بالرسومات المتحركة مناسبة تمامًا للسماح بإجراء حوار عاطفي بين الإنسان والروبوت. هذا الحوار أحادي الجانب تمامًا بالطبع: فالشريك البشري هو من يقوم بكل العمل العاطفي. على سبيل المثال، الروبوت «كيسمِت»، الذي طوَّرته سينثيا بريزيل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، لديه عينان كبيرتان مزوَّدتان بمحركات، إضافةً إلى حاجبَين وفم (متحركين) وذوي تصميم بسيط (انظر الشكل ٤-٢).

كيسمِت رأس روبوتي شبيه البشر، وهو يحظى باهتمام خاص؛ لأنه يُبيِّن مدى فعالية التفاعل الاجتماعي بين الروبوت والإنسان وتأثيره، وذلك على الرغم من أنه آلي الشكل، ويمكن رؤية جميع مكوناته المعدنية ومحركاته بوضوح.

عينا كيسمِت عبارة عن كاميرات قادرة على الحركة، ويتحرك كذلك كلٌّ من الرقبة والفكَّين والأذنين والحاجبين والجَفنين. كاميرات كيسمِت مثيرة للاهتمام لأنه مجهَّز بأربع كاميرات: كاميرتان واسعتا المجال يستخدمهما الروبوت ليُقرِّر ما يجب الانتباه إليه في مجال رؤيته، وكاميرتان ضيِّقتا المجال لـ «الرؤية النقيرية»، مثبَّتتان في مقلتَي عينَي الروبوت لتركيز هذا الانتباه. ويحتوي الروبوت أيضًا على ميكروفون، يتحكم في نظام التعرف على الكلام، ونظام تركيب الكلام الذي يتحكم في مكبر الصوت، ليتمكن كيسمِت من التعرف على الكلام والرد عليه. وعلى الرغم من بساطة تصميم كيسمِت، فهو يحتوي على جميع مكونات إشراك البشر في التواصل الطبيعي والتعبيري وجهًا لوجه.

إن كيسمت مزوَّد ببرنامج ذكاء اصطناعي متطور يستجيب لإشارات الوجه والتعبيرات اللفظية الخاصة بالبشر، ويمد الروبوت بمجموعة من «المشاعر» الاصطناعية، منها الغضب والاشمئزاز والخوف والفرح والحزن والاندهاش، وهي مصمَّمة على غرار التفاعلات الاجتماعية بين الرضيع والشخص القائم برعايته. ونتيجةً لذلك، يستجيب كيسمِت للتفاعلات الاجتماعية مع الإنسان بطريقة تجعله محبوبًا دائمًا من البشر الذين يتفاعل مهم، وأي شخص يشاهده.

إذا نجحنا في إضفاء المشاعر على الروبوتات الشبيهة بالبشر البسيطة نسبيًّا، فتخيل مدى قوة الانطباع الذي سيخلفه الروبوت إذا صُمم بعناية لمحاكاة تعابير الوجه البشري بدرجة عالية من الواقعية. يصمم ديفيد هانسون رءوس روبوتات بشرية تسمح لعلماء



شكل ٤-٢: كيسمِت، رأس روبوت معبر مخصص لإجراء الأبحاث في مجال التفاعل الاجتماعي بين الإنسان والروبوت

الروبوتات بتجربة المشاعر الاصطناعية، أو لكي نكون أكثر دقة، تسمح لهم بمحاكاة مظهر الوجه الخارجي للحالات العاطفية.

ومن تصميم شركة هانسون روبوتكس وصناعتها، نتج الروبوت جولز، وهو نموذج لرأس روبوت بشري صُمم لمحاكاة تعابير الوجه البشري بأعلى دقة ممكنة باستخدام التقنيات الحالية (انظر الشكل ٤-٣). يتميز الروبوت جولز بابتكارَين أساسيين. الابتكار الأول هو «الجلد المطاط»، وهو بوليمر إسفنجي مرن حاصل على براءة اختراع يوفر محاكاة مُقنِعة للطريقة التي يتحرك بها الجلد البشري والعضلات الموجودة تحته. والابتكار الثاني هو تصميم اثنين وثلاثين محركًا مؤازرًا، والربط بينها باستخدام أسلاك تدفع الجلد المطاطي الفاتح اللون من الخلف، وتسحبه أيضًا.

عند تشغيل هذه المحركات بالتسلسل والتوقيت الصحيحين، فإنها توفر محاكاة واقعية لحوالَي خمسين مجموعة عضلية في وجه الإنسان؛ مما يسمح لجولز بأداء مجموعة كبيرة من تعابير الوجه، من العبوس إلى الابتسام، ومن الحيرة إلى الاستياء. ويهدف جولز إلى إتاحة إمكانية إجراء محادثة وجهًا لوجه بين الروبوت والإنسان، وقد صُممت شفتا

جولز وفمه بحيث تتحرك بالتزامن مع الكلام المُركَّب عن طريق الكمبيوتر، وهي توفر بالفعل محاكاةً جيدة لطريقة تحرُّك شفتَي الإنسان خلال الحديث.

شكل ٤-٣: جولز، رأس روبوت بشري معبر عالي الدقة

لدى جولز أيضًا محركات تمكِّنه من أداء مهارات الرأس الحركية الكبيرة، سواء لخفض الرأس أو إمالته، أو حتى توفير حركات عشوائية صغيرة (لأن رأس الروبوت الساكن تمامًا سيبدو غير طبيعي). والأهم من ذلك هو عينا جولز، اللتان لا تبدوان بشريتَين فحسب، بل تتحركان أيضًا بطريقة نابضة بالحياة؛ علاوةً على ذلك تحتوي العينان على كاميرات، فيمكن لجولز، باستخدام البرنامج المناسب للتعرف على الوجوه وتتبعها والمتصل بمحركات العينين، أن ينظر إلى الوجه البشري ويتتبعه. ولإكمال الانطباع البشري، تتحرك جفون الروبوت ليرمش جولز بشكل دوري لا إرادي.

ومن الجوانب المثيرة للاهتمام، وربما الفريدة في رءوس الروبوتات البشرية من هانسون، إمكانية تصميم وجه الروبوت على غرار شخص حقيقي، وأحد الأمثلة الشهيرة

بالفعل هو نموذج روبوت شركة هانسون المصمَّم على شكل مؤلِّف الخيال العلمي فيليب كيه ديك. ومن خلال برامج المحادثة المخصَّصة القائمة على تقنية روبوتات الدردشة (التي سأناقشها في الفصل السادس)، يمكن للمرء (بشكل غريب) إجراء محادثة مع روبوت لا يبدو كشخص حقيقي فحسب، بل يبدو أنه يمتلك ذكريات أو سمات شخصية لهذا الشخص. بالرغم من ذلك، لم يُصمَّم جولز على غرار شخص حقيقي، ولكنه صُمم بسمات مشتركة بين الجنسين محدَّدة إحصائيًّا.

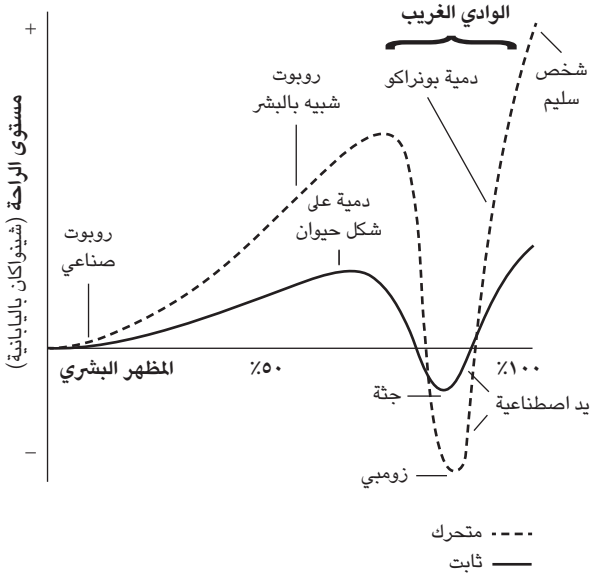
من الجلي أن تصميم روبوتات تتصرف «كما لو» كان لديها مشاعر، يطرح أسئلة أخلاقية؛ لأنه سواء أكان الروبوت يشبه البشر لكن بشكل كرتوني مثل كيسمِت أو يتميز بشكل بشري عالي الدقة مثل جولز، فإنَّ الحالات العاطفية تنبع بالكامل من عينَي الناظر البشري. ولا يمكن القول حقًّا إن أيًّا من هذه الروبوتات، ولا أي روبوت لم يُصمَّم بعد، لديه مشاعر. إنها في أفضل الأحوال روبوتات ممثلة، مصمَّمة لخداع الآخرين، وربما صدمتهم إذا هبطت إلى «الوادي الغريب» (انظر المربع ٢).

ماذا لو لم تكن الروبوتات مصمَّمة للمراهقين أو البالغين الذين يدركون تمامًا اصطناعية الروبوت وعواطفه، لكن للأطفال أو المستخدمين الساذجين أو الضعفاء الذين سيجدون صعوبة في فهم أنه روبوت يتظاهر بالسعادة أو الحزن أو السرور برؤيتهم؟ أعتقد أن هذا مصدر قلق حقيقي وأمر يتطلب مبادئ توجيهية أخلاقية، وهذا ما سأناقشه لاحقًا في هذا الفصل.

المربع ٢: الوادي الغريب

يواجه مصمِّمو الروبوتات الشبيهة بالبشر مشكلةً رائعة فريدة من نوعها، تُعرف باسم «الوادي الغريب». كان مَن اقترح هذا المصطلح هو عالم الروبوتات ماساهيرو موري في عام ١٩٧٠، وهو يعرض فيه تصورًا لما يمكن أن تكون عليه استجابة البشر عندما تصبح الروبوتات أكثر شبهًا بالإنسان. يتضمن الرسم البياني الذي قدَّمه موري، والموضَّح هنا في الشكل ٤-٤، محورًا أفقيًّا يمتد من يشبه البشر بنسبة صفر بالمائة على اليسار إلى من يشبه البشر بنسبة ١٠٠ بالمائة على اليمين.

حاجَج موري بأنَّ رد فِعلنا تجاه الروبوتات سيصبح أكثر إيجابيةً كلما زادت درجة الشبه بين الروبوت والإنسان، إلى أن يصبح الروبوت الذي يشبه البشر قريبًا جدًّا في المظهر والسلوك من البشر الحقيقيين، وحينها سيكون رد فعلنا سلبيًّا للغاية، تجاه الروبوتات القريبة الشبه بالإنسان. هذا هو رد الفعل الذي أطلق عليه موري اسم الوادي الغريب. واقترح موري أيضًا أن رد الفعل



شكل ٤-٤: الوادي الغريب

العكسي هذا سيكون أكثر حدةً في حالة الروبوتات المتحركة مقارنةً بالروبوتات الثابتة. إنها فكرة تشير إلى حساسيتنا غير العادية للمظهر أو السلوك، بعضنا تجاه بعض، إذا كان يختلف عن المعتاد، وإن كان هذا الاختلاف طفيفًا للغاية لا يسهل ملاحظته.

هل نظرية الوادي الغريب حقيقية، وإذا كان الأمر كذلك، فهل تمثل مشكلة خطيرة في تطوير الروبوتات التي تشبه البشر واستخدامها؟ يبدو أن تجربتي الخاصة بردِّ فعل زوار المختبر على أحد رءوس روبوتات ديفيد هانسون البشرية — خاصةً الخوف لدى الأطفال الصغار — تؤكد فرضية الوادي الغريب بالطبع (على الرغم من حقيقة أن صدمة الأطفال ربما ترجع بدرجة ما إلى رءوس الروبوتات العديمة الأجساد الموضوعة على سطح الطاولة). وقد أجرى عالم الروبوتات هيروشي إيشيجورو دراسات تضمَّنت تسجيل رد فعل البشر تجاه صور مصمَّمة على الكمبيوتر لرءوس «تتحول» من الشكل الشبيه بالبشر إلى إنسان، ويبدو أن هذه الدراسات تؤكد فرضية موري.

وهنا يظهر السؤال الآتي: ما عواقب الوادي الغريب؟ في ظاهر الأمر، قد تشير تلك النظرية إلى أنه لا جدوى من بناء روبوتات بشرية واقعية إلى أن يحين وقتٌ ما في المستقبل نتمكن فيه من جعلها

واقعية للغاية في كلٍّ من السلوك والشكل كي نصعد من الوادي الغريب. بالرغم من ذلك، فقد يظل للروبوتات التي تبقى في الوادي الغريب دور في بعض التطبيقات، منها مثلًا الروبوتات الشبيهة بالبشر التي يُطلب منها سوى أن تكون تماثيل عرض متحركة — مثل موظفي الاستقبال الآليين في شركات التقنيات الفائقة — أو استخدام الروبوتات في الأدوار التي قد تستفيد من الغرابة، مثل الفنون أو المسرح. فهل تستبعد نظرية الوادي الغريب الروبوتات البشرية من القيام بالأدوار التي يُطلب منها التفاعل مع الأطفال أو كبار السن أو الأشخاص الضعفاء؟ ربما. وقد يكون من الأفضل أن يخدم هذه المجموعات روبوتات الكرتون أو الروبوتات الشبيهة بالبشر وليس الروبوتات البشرية. لكن ذلك مما يصعب التكهن به. فنحن لا نعرف حتى الآن ما يكفي عن سيكولوجية التفاعل بين الإنسان والروبوت.

(٢-١) الروبوتات الأليفة: الروبوتات الحيوانية الشكل

تُعرَف الروبوتات التي صُمم شكلها وهيكلها على الحيوانات بأنها حيوانية الشكل، وتنطبق العديد من أسباب بناء الروبوتات التي تشبه البشر أو استخدامها على الروبوتات الحيوانية الشكل. فالروبوتات الأليفة، على سبيل المثال، مصمَّمة لتكون ألعابًا للبشر أو رفقاء لهم. ربما يكون المثال الأكثر شهرةً هو روبوت الكلب أيبو من سوني، وثَمة روبوت أليف آخر أقل تطورًا — لكن يمكن عناقه أيضًا — هو الروبوت بارو من شركة يابانية أخرى، وهي شركة إنتيليجنت سيستمز (انظر الشكل ٤-٥).

بارو روبوت حيواني الشكل متقدم مصمَّم على غرار جرو الفقمة العديمة الأذن. وقد صُمم الروبوت خصوصًا لتوفير الراحة وكمساعد علاجي في المستشفيات أو دور رعاية المسنين، ويحتوي على خمسة أنواع من أجهزة الاستشعار، للمس والضوء والصوت ودرجة الحرارة والتوجيه. ويستطيع الروبوت تحريك الرأس، والجفنين، والساقين الأماميتين، والذيل. ويحتوي الروبوت على برنامج ذكاء اصطناعي يمكن بارو من الاستجابة للمس أو التمسيد عن طريق تحريك جسمه وإطلاق «صيحات» مشابهة لما تطلقه جراء الفقمة، وتتميز استجابات الروبوت بدرجة من العشوائية تُضفي عليها حيوية مقنعة ومريحة.

والجدير بالذكر أن بارو قادر على التعلم: فعند تمسيده، من المرجَّح أن يكرر السلوك الذي صدر عنه قبل التمسيد. وإذا ضُرب، فمن غير المرجَّح أن يكرر السلوك السابق على الضرب، مما يزود الروبوت بسلوكيات تكييف بسيطة تتماشى مع نظريات عالم النفس سكينر. ويمكن للروبوت أيضًا أن يتعرف على اسمه عند نطقه، وهو مبرمَج ليتجه نحو

شكل ٤-٥: بارو، روبوت جرو الفقمة

الصوت، ولديه مجموعة من الاستجابات العاطفية الاصطناعية، مثل الاندهاش والسعادة والغضب. كان بارو موضوع عدد من التجارب الموثقة، ويبدو بالفعل أنه أثبت فعاليته كحيوان أليف بديل. وأنا أعتقد من وجهة نظري أنَّ بارو يمثل إنجازًا مهمًّا في التطور المبكر للروبوتات الرفيقة.

(٢-٢) روبوتات الجنس

السوق الواضحة للروبوتات التي تشبه البشر، والتي من المحتمل أن نراها في المستقبل القريب، هي الألعاب الجنسية. وتُعرف تجارة الجنس بأنها من أوائل المجالات التي تتبنى التقنيات الجديدة؛ وما على المرء إلا التفكير في شرائط الفيديو والإنترنت. ليس من المفاجئ إذَن معرفة أن رواد الأعمال في تجارة الجنس يقومون بالفعل بتزويد الدُّمى الجنسية بأجهزة استشعار ومشغلات وبرامج ذكاء اصطناعي بسيطة. صحيح أنَّ الروبوت جيجولو جو، الذي أدَّى دورَه الممثلُ جود لو في فيلم «الذكاء الاصطناعي» (إيه

آي أرتيفيشال إنتيليجنس) لا يزال خيالًا بعيد المنال، لكن يبدو من المحتمل — على نحو محبط — أن يكون أول سوق كبيرة للروبوتات التي تشبه البشر هي الألعاب الجنسية أو رفقاء لممارسة الجنس.

بالرغم من أن هذا قد يبدو غير ضار للبالغين، فثَمة نوعان من الأخطار كما أعتقد؛ أحدهما قصير المدى والآخر طويل المدى. الخطر القريب المدى هو السلامة؛ فممارسة الجنس مع روبوت قد لا تكون أمرًا آمنًا بكل صراحة. فما دام الروبوت يمتلك محركات وأجزاءً متحركة، يصبح ضمان سلامة التفاعل بين الإنسان والروبوت مشكلة صعبة، وإذا كان هذا التفاعل حميميًّا، فقد تكون عواقب حدوث عطل ميكانيكي أو عطل في أنظمة التحكم أمرًا خطيرًا.

وعلى المدى الطويل، تكون الأخطار من نوع مختلف. إذا لم يكن الروبوت الجنسي أكثر ذكاءً من الغسالة، فلن يشكل خطرًا معنويًّا حقيقيًّا، لكن تخيل ما قد يحدث إذا كان روبوت الجنس أو روبوت الرفيق يتمتع بمستوًى مرتفع جدًّا من ذكاء الآلة. الحق أنَّ إمكانية حدوث علاقات حميمة بين الإنسان والروبوت تثير مجموعة واسعة من القضايا الاجتماعية والنفسية والأخلاقية الصعبة. وقد كتب البعض عن احتمالية وقوع البشر في حب الروبوتات الشبيهة بالبشر والحفاظ على علاقات طويلة الأمد، يمكن أن تصل إلى الزواج.

رغم أن موضوع حب الروبوتات والزواج منها ليس محل بحث في هذا الكتاب، فإنه يفتح المجال لطرح السؤال الأكثر إثارةً للاهتمام بشأن مدى أصالة الاستجابات العاطفية للروبوت. فقد يُحاجِج كثيرون بأن الروبوت الذي لا يتصرف إلا «كما لو» كان لديه مشاعر لا يمكن أن يكون رفيقًا حقيقيًّا على المستوى العاطفي. غير أنني أختلف مع هذا الرأي، وأعتقد أنه إذا كان بإمكانك الوثوق في روبوت، فإنَّ حجة «كما لو» تختفي إذا كان الروبوت متطورًا بدرجة كافية.

(٣) كرونوس: دراسة حالة لروبوتات المستقبل التي تشبه البشر

ربما يكون كرونوس واحدًا من أغرب الروبوتات التي تشبه البشر المصمَّمة حتى الآن (انظر الشكل ٤-٦). فبمظهره الذي يشبه الهيكل العظمي وعينه الواحدة، يمكن القول إنَّ تصميمه أليَقُ بفيلم رعب، لكن مظهر الروبوت إنما يعبر عن الأفكار الجذرية التي تقف وراءه، وهي أفكار قد يكون لها عواقب بعيدة المدى على الطريقة التي نصمم بها الروبوتات التي تشبه البشر، وعلى الذكاء الاصطناعي الخاص بها.

يتكون جسم كرونوس من مجموعة من العناصر الهيكلية اليدوية الصنع والمنحوتة يدويًّا حرفيًّا من بلاستيك مُلين حراريًّا تحت درجة حرارة منخفضة. ورغم أن العناصر البنيوية لـ «الهيكل العظمي» لا تهدف إلى أن تكون دقيقة من الناحية التشريحية، فقد نُسخ العديد منها من كتاب «تشريح جراي»، وتبدو شديدة الشبه بالعظام الحقيقية، ولا غرو في هذا إذا كان الهدف العام هو إنتاج روبوت يشبه البشر حقًّا. يختلف كرونوس عن التصميم التقليدي للروبوتات في أنَّ وضع سكون المفاصل بين «العظام» الفردية لا يُضبط بصرامة من خلال موضع محرك كهربائي، بل من خلال سلسلة من النوابض والأوتار المتوازنة بعناية، والعديد منها مصنوع من حبال القفز المطاطية. معنى هذا أن جسد كرونوس يتسم بقدر عالٍ من المطاوعة والمرونة: فعند دفع أحد ذراعيه، لن يرضخ الذراع لدفعك فحسب، بل سينثني الجسم كله استجابةً لذلك.

شكل ٤-٦: كرونوس، روبوت يشبه البشر ويحاكي حركاتهم الجسدية

لا شك أنَّ كرونوس يحتوي على محركات، لكن هذه المحركات، الموضوعة بما يتطابق مع عضلات جسم الإنسان، تعمل عن طريق سحب الحبال المرنة المتصلة بالهيكل العظمي، فتؤدي حركة محرك واحد إلى تحرك الروبوت بأكمله بطريقة معقدة. وفي نهاية الحركة، عادةً ما «يهتز» الروبوت قبل الاستقرار في وضعه الجديد. ويتناقض هذا بشكل ملحوظ مع مناهج تصميم الروبوتات الصارمة التقليدية (التي تشترك فيها الأذرع الروبوتية الصناعية والروبوتات التي تشبه البشر مثل بيرت)، حيث تُبذل جهود كبيرة لضمان أن حركة محرك المفصل الواحد لا تؤثر إلا على موضع هذا المفصل المحدد؛ وتتمثل ميزة المنهج «الثابت» التقليدي في سهولة التحكم في الروبوتات (نسبيًّا). فبسبب مستوى المطاوعة المرتفع الذي يتسم به كرونوس، يُعَد التحكم فيه صعبًا للغاية، لكن تلك هي الفكرة الأساسية في الواقع.

لقد ابتُكر كرونوس ضمن مشروع لاستكشاف السؤال (الصعب) المتعلق بوعي الآلات. واستنتج عالم الروبوتات أوين هولاند وزملاؤه أن الجسم المعقَّد الذي يصعب التحكم فيه يتطلب نهجًا جديدًا لكيفية تحكم الروبوت في جسده. فالروبوتات الثابتة التقليدية مثل بيرت، لها حركات جسدية محددة بشكل أو بآخر من خلال مجموعات من المعادلات التي تُبرمَج في صورة خوارزميات تحكم. غير أنَّ تطبيق هذا النهج مستحيل في حالة روبوت مثل كرونوس، فعلى النقيض من ذلك، يتضمن الروبوت بداخله محاكاةً ذاتية بالكمبيوتر. ويستخدم كرونوس نموذجه الداخلي بالطريقة الآتية: عند مواجهة مهمة، يبدأ كرونوس بإعداد نموذج افتراضي لنفسه وبيئته ليطابق الوضع المادي كما هو عليه في بداية المهمة (على سبيل المثال، جسم على طاولة يجب إسقاطه)، ثم يجرب على ذاته الافتراضية برامج حركية مختلفة حتى يجد برنامجًا يحقق المهمة (أي إسقاط الجسد بنجاح). يبدو الأمر كما لو أن الروبوت لديه خيال ويستطيع التدرب على تحركاته وتفاعلاته قبل تجربتها على أرض الواقع.

من الناحية المثالية، يجب أن يكون كرونوس قادرًا على تعلم تصميم جسده وحركاته — لبناء النموذج الداخلي الخاص به فعليًّا — ثم تكييف هذا النموذج الداخلي وتحديثه باستمرار على مدار عمل الروبوت ومع تآكل مفاصله وأوتاره، على سبيل المثال. ولتحقيق ذلك، سيحتاج كرونوس إلى التصرف على النحو الآتي: خلال مرحلة التطور، سيحاول الروبوت القيام بحركات مختلفة، لتدريب عضلاته ومفاصله فعليًّا. وستُقاس التأثيرات الفعلية لتلك الحركات على جسم كرونوس وتُرسَل مرةً أخرى إلى نظام محاكاة الروبوت

— أي نموذجه الداخلي — ليتحسن النموذج بمرور الوقت. وبهذا، سيتعلم كرونوس كيفية التحكم في جسده في عملية يمكن تشبيهها بتطور الحركات الجسدية لدى الرُّضع. وتُدرَس الآن هذه الفكرة في إكيرو-بوت، خليفة كرونوس الأكثر تعقيدًا.

في الفصل الثاني، قدَّمتُ فكرة روبوتات المحاكاة الحيوية، وجميع الروبوتات التي تشبه البشر هي بالطبع نموذج للمحاكاة الحيوية؛ بمعنى أنها تحاكي الشكل العام للبشر وهيئتهم. غير أنَّ كرونوس يتجاوز هذا الأمر حيث إنه يشبه البشر ويحاكي هيئتهم من الداخل وكذلك من الخارج. وهذا يعني، كما يرى هولاند وزملاؤه، أن طريقة التحكم في كرونوس يجب أن تكون محاكاةً أفضل للطريقة التي نتحكم بها نحن البشر في أنفسنا وتفاعلاتنا الجسدية مع العالم. وهم يأملون أنه بسبب تصميم كرونوس، سيَتَّسم هو وخلفاؤه ببعض الخصائص الإدراكية التي تشبه تلك الخاصة بالبشر.

تكمن أهمية كرونوس الخاصة في أنه يمهد الطريق إلى جيل مستقبلي من الروبوتات الشبيهة بالبشر التي تتميز بالخفة والمرونة والمطاوعة. وستكون هذه الصفات ضرورية للروبوتات التي تتفاعل من كثَب مع البشر؛ لأنها تقلل من احتمالية أن يتسبب الروبوت في ضرر جسدي للإنسان. ذلك أنه إذا اصطدم ذراع الروبوت الطيِّع من غير قصد بجزء من جسمك، فإن مطاوعته الطبيعية ستمتص معظم طاقة الاصطدام — «الصادرة» من ذراع الروبوت وجسمك — ولن تتأذى.

لا بد بالطبع من تصميم مستشعرات الروبوت وذكائه الاصطناعي لتقليل احتمالية حدوث اصطدام عرضي، بالرغم من ذلك لا يزال ضمان التشغيل الآمن للتحكم الذكي في البيئات غير المتوقعة أمرًا مستحيلًا؛ وبهذا تكون المطاوعة الطبيعية للروبوت هي الملاذ الأخير في حالة تعطل ميزات الأمان الأخرى. وستحتاج الروبوتات المستقبلية التي تشبه البشر إلى أن تكون خفيفة ومطاوعة؛ لأنها لن تكون آمنة إلا بهذه الطريقة.

(٤) سلامة التفاعل بين الإنسان والروبوت ومصداقيته

تشترك جميع التطبيقات المحتملة للروبوتات التي تشبه البشر، والتي قسمتها بشكل عام إلى الروبوتات المساعدة في أماكن العمل أو الروبوتات الرفيقة (بما في ذلك روبوتات المحادثات والروبوتات العلاجية، والروبوتات الحيوانية الشكل)، في شيء واحد، وهو: التفاعل الوثيق بين الإنسان والروبوت. وتتَّسم طبيعة هذا التفاعل بالتقارب الوثيق والتواصل عبر الوسائل البشرية الطبيعية، مثل الكلام والإيماءات ولغة الجسد.

قد يحتاج الإنسان والروبوت إلى الاتصال الجسدي وقد لا يحتاجان إلى ذلك، لكن حتى عندما لا يكون الاتصال المباشر مطلوبًا، فينبغي أن يوجد كلٌّ منهما في النطاق الذي يشغله الآخر. ويترتب على ذلك أن سلامة الروبوت واعتماديته وموثوقيته تمثل قضايا رئيسية لمصمم الروبوت. غير أننا نحن البشر غير قابلين للتنبؤ، فكيف يمكننا أن نُصمِّم ونصنع روبوتات بشرية آمنة في جميع الظروف؟

على غرار أي آلة تُكلَّف أو يوكل إليها بوظيفة معيَّنة، لا بد أن تُصمَّم الروبوتات لتكون آمنة ويمكن الاعتماد عليها. هذا هو مستوى الاعتمادية ذاته الذي نتوقعه من سيارة أو غسالة؛ أي أن تكون مصمَّمة جيدًا ومصنوعة لتلبية معايير التصنيع وسلامة المنتج أو تجاوزها.

غير أنَّ جعل الروبوتات آمنة يختلف عن جعلها جديرة بالثقة. يثق الإنسان في إنسان آخر إذا كان، بشكل عام، يُعتمد عليه ويفعل ما يقوله. لذا، إذا كنت سأُوفِّر روبوتًا يساعد في رعاية جدتك وأدَّعي أنه آمن تمامًا — وأنه مصمَّم لتغطية كل المخاطر أو الأخطار — فهل تثق به؟ سيكون الجواب بلا على الأرجح.

لا بد من كسب الثقة في الروبوتات، مثلما هو الحال تمامًا مع البشر. ففي بادئ الأمر، سترغب في رؤية الروبوت وهو يعمل (وستُفضِّل ألا يكون هذا مع جدتك). وربما ترغب في التفاعل معه بنفسك؛ ومن خلال القيام بذلك، تبني نموذجًا عقليًّا لتصرفات الروبوت وردود فعله؛ وبمرور الوقت، إذا كانت هذه الأفعال وردود الأفعال متسقة مع الظروف ومتوقَّعة بالنسبة لها، فإنك ستنشئ مستوًى من الثقة بالروبوت. ما يهمُّ هنا هو أن الموثوقية لا يمكن تصميمها في الروبوت فحسب، بل يجب اكتسابها بالاستخدام والتجربة.

تخيل روبوتًا مصمَّمًا لجلب المشروبات لشخص مُسِن. وتخيل أن الشخص يطلب كوبًا من الماء. يحتاج الروبوت حينها إلى إحضار المشروب، الأمر الذي قد يتطلب من الروبوت البحث عن كوب وملْأَه بالماء. تتطلب هذه المهام الاستشعار والبراعة والتحكم في الحركات الجسدية، لكنها مشكلات يمكن حلها بالتقنيات الحالية.

تظهر أزمة الثقة عندما يجلب الروبوت كوب الماء للإنسان. فكيف سيعطي الروبوت الكوب للإنسان؟ إذا كان للروبوت ذراع تُمكِّنه من الإمساك بالكوب مثلما يفعل الإنسان، فكيف يعرف الروبوت متى يتركه؟ من الواضح أن الروبوت يحتاج إلى أجهزة استشعار لكي يرى عندما يمسك الإنسان بالكوب ويشعر بذلك.

إن العملية الفيزيائية التي يقوم بها الروبوت الذي يسلم شيئًا ما لشخص ما محفوفة بالصعوبات. تخيل، على سبيل المثال، أن الروبوت يمد ذراعه بالكوب لكن الإنسان لا يستطيع الوصول إليه. كيف يُقرِّر الروبوت الاتجاه والمدى الآمنَين لتقريب ذراعه نحو الشخص؟ ماذا لو أمسك الإنسان بالكوب ثم انزلق الكوب؛ هل يتركه الروبوت يسقط أم يجب — كما يفعل الإنسان — أن يمسك به مرةً أخرى؟

في أي مرحلة سيُقرِّر الروبوت أن العملية قد فشلت: عندما لا يتمكن من إعطاء كوب الماء للشخص، أو عندما لا يأخذ الشخص الكوب؛ ربما كان الشخص نائمًا، أو نسي أنه كان يريد كوبًا من الماء، أو اختلط عليه الأمر. كيف يشعر الروبوت أنه يجب أن يستسلم وربما يطلب المساعدة؟ هذه كلها مشكلات صعبة فيما يتعلق بإدراك الروبوت. وحتى نتمكن من الوصول إلى حل، لا يبدو أننا سنثق في أي روبوت بما يكفي للقيام بفعل يبدو بسيطًا مثل مناولة كوب من الماء. فكيف يمكننا أن نبدأ التفكير في تصميم روبوت يمكن الوثوق به في هذا النوع من المهام؟

من وجهة نظر تقنية، يحتاج الروبوت إلى نظامَين من أنظمة التحكم: أحدهما نظام الإدراك الذي ينفذ المهمة فعليًّا. والآخر هو نظام السلامة، وهو نظام موازٍ يتحقق باستمرار من الأعطال أو الأخطار غير المتوقَّعة. وتتمثل المهمة الأساسية لنظام حماية السلامة في إيقاف الروبوت بطريقة آمنة (مع ملاحظة أن هناك بعض المواقف التي سيكون توقف الروبوت فيها أمرًا غير آمن). ولهذا يجب علينا أولًا أن نحل مشكلات الإدراك والسلامة. وبعد ذلك، يجب أن يُثبِت الروبوت أنه يمكن الاعتماد عليه في الاستخدام. وحينها فقط ربما يكسب ثقتنا.

(٥) أخلاقيات الروبوتات

في قصته القصيرة المشهورة التي نُشرت عام ١٩٤٢ بعنوان «المراوغة»، قدَّم إسحاق أزيموف قوانينه الثلاثة الخاصة بالروبوتات؛ ومن ثَم طرح فكرة أن الروبوتات يمكنها أن تتصرف بشكل أخلاقي أو ينبغي عليها ذلك. (على هامش هذا الأمر، كان أزيموف أيضًا أول من ابتكر مصطلح «روبوتكس»؛ أي علم الروبوتات في اللغة الإنجليزية.) لا شك أنَّ قوانين الروبوتات التي وضعها أزيموف كانت أمرًا خياليًّا. فهو لم يتوقع جديًّا قَط أن يفكر علماء الروبوتات في المستقبل في تصميم روبوتات حقيقية؛ فقد كان يدرك جيدًا مدى صعوبة ذلك الأمر.

بالرغم من ذلك، أصبحت فكرته بأن الروبوتات يجب أن تكون «آمنة فيما يتعلق بالقوانين الثلاثة» جزءًا من نقاشات علم الروبوتات. فمن الصعب مناقشة أخلاقيات الروبوتات دون الاعتراف بمساهمة أزيموف، وهو يستحق ذلك بالطبع. دعونا نُذكِّر أنفسنا بقوانينه الثلاثة الخاصة بالروبوتات؛ أولًا: لا يجوز لروبوت إيذاءُ بشري أو السماح بحدوث ما قد يؤذيه، من خلال عدم اتخاذ أي إجراء؛ ثانيًا: يجب على الروبوت إطاعة أوامر البشر، إلا إذا تعارضت مع القانون الأول؛ وثالثًا: يجب على الروبوت المحافظة على بقائه طالما لا يتعارض ذلك مع القانونين الأول أو الثاني. أضاف أزيموف لاحقًا قانونًا رابعًا، وهو: لا ينبغي لأي روبوت أن يؤذي البشرية، أو أن يسمح للبشرية بإيذاء نفسها من خلال عدم اتخاذ أي إجراء، وقد أصبح هذا القانون يُعرف باسم القانون صفر؛ لأنه يسبق القوانين الثلاثة الأولى منطقيًّا.

المشكلة الأساسية في قوانين الروبوتات لأزيموف، أو ما يشبهها، هي أنها تتطلب من الروبوت إصدار الأحكام. بمعنًى آخر، أنها تفترض أن الروبوت قادر على تطبيق مستوًى معيَّن من المسئولية الأخلاقية. ولمعرفة سبب ذلك، تأمَّلْ معي القانون الأول: لا يجوز لروبوتٍ إيذاء … أو السماح بحدوث ما قد يؤذيه، من خلال عدم اتخاذ أي إجراء. يشير مصطلح «من خلال عدم اتخاذ أي إجراء» إلى أن الروبوت قادر على تحديد ما إذا كان الإنسان في خطر أم لا، وقادر على تحديد ما إذا كان الإجراء ضروريًّا لمنع الضرر المحتمل أم لا، وقادر أيضًا على تحديد الإجراء المطلوب. ويضاعف القانونان الثاني والثالث المشكلة من خلال مطالبة الروبوت بإصدار حكم بشأن ما إذا كانت طاعة الإنسان، أو حماية نفسه، تتعارض مع القانون الأول (والثاني). ولا يوجد روبوت نستطيع تصميمه حاليًّا أو في القريب العاجل يمتلك ما يكفي من «الذكاء» ليكون قادرًا حتى على التعرف على هذه الأنواع من الخيارات، ناهيك عن اتخاذها.

حتى لو كان روبوت المستقبل البعيد ذكيًّا بما يكفي لإصدار أحكام أخلاقية؛ فلكَي يُسمح له بالقيام بذلك، لا بد للمجتمع أن يمنحه الحق في أن يُنظَر إليه على أنه فرد مسئول أخلاقيًّا؛ بعبارة أخرى، منح الروبوت هُوية شخصية (أو شيئًا يشبهها إلى حد كبير). ومع الحقوق تأتي المسئوليات، التي ستشكل مرةً أخرى مشكلة صعبة على المجتمع؛ مما يطرح السؤال الآتي: ما العقوبات التي ستكون مناسبة مثلًا للروبوت الذي يخرق قوانين الروبوتات؟ ولكي تكون الروبوتات «آمنة فيما يتعلق بالقوانين الثلاثة»، لن يتطلب الأمر تقدمًا كبيرًا في الذكاء الاصطناعي للروبوتات فحسب، بل سيتطلب أيضًا

تغييرًا كبيرًا في الوضع القانوني للروبوتات، للتحول من منتجات إلى أفراد مسئولين أخلاقيًّا ذوي حقوق ومسئوليات.

يتفق معظم علماء الروبوتات على أن الروبوتات في المستقبل القريب لا يمكن أن تكون مسئولة أخلاقيًّا ومعنويًّا. (على الرغم من أن بعضهم يزعم، جدلًا، أنه يمكن في المستقبل تصميم روبوتات لديها وعي اصطناعي يمكنها من تشفير سلوكيات قواعد الاشتباك العسكرية.) بالرغم من ذلك، يتفق علماء الروبوتات على أن أخلاقيات الروبوتات هي قضية مهمة للمجتمع، وقد بُذلت العديد من الجهود الجادَّة في هذا الاتجاه، من بينها إعداد «خارطة طريق لأخلاقيات الروبوتات» في أوروبا، و«ميثاق لأخلاقيات الروبوتات» في كوريا الجنوبية، ومشروع «المبادئ التوجيهية لضمان أمان أداء الجيل القادم من الروبوتات» في اليابان.

لماذا إذَن تُعَد أخلاقيات الروبوتات مسألةً مهمة، إذا كانت الروبوتات لا يمكن أن تكون أخلاقية؟ هناك سببان. الأول هو أن الروبوتات بدأت تُستخدم في بيئات عمل البشر ومعيشتهم، وكما وصفت في هذا الفصل، سيُطلب من هذه الروبوتات التفاعل من كثَبٍ مع الأشخاص العاديين، بما في ذلك الأطفال، والأشخاص الضعفاء، وكبار السن: وهي تطبيقات تتطلب ضمانات قوية فيما يتعلق بالتصميم والتشغيل والخصوصية.

والسبب الثاني هو أنه ثَمة خطر من وجود فجوة بين ما يعتقد مستخدِمو الروبوتات أن هذه الروبوتات قادرة على فعله وما تقدر عليه بالفعل، والسبب وراء ذلك تحديدًا، كما رأينا، أن الروبوتات «الذكية» الحالية ليست ذكية جدًّا. وبالنظر إلى ميل البشر إلى إضفاء الصفات البشرية للآلات وإنشاء ارتباطات عاطفية معها، فمن الواضح أن ثَمة خطرًا يتمثل في إمكانية استغلال نقاط الضعف هذه إما عن غير قصد أو عن قصد.

وعلى الرغم من أن الروبوتات لا يمكن أن تتحلى بالأخلاق، فينبغي على علماء الروبوتات أن يتحلوا بها. ولذلك أدعو إلى أن يخضع الباحثون في علم الروبوتات والمصمِّمون والمصنِّعون والمورِّدون والقائمون على الصيانة لمدوَّنة قواعد الممارسة، مع المبدأ التأسيسي القائل بأن الروبوتات لديها إمكانية تحقيق فائدة كبيرة جدًّا للمجتمع. فكيف يمكن أن تبدو مدونة قواعد الممارسة هذه؟

تقترح إحدى مجموعات مشاريع المبادئ الأخلاقية للروبوتات، التي صاغها فريق عمل بريطاني، ما يأتي:

(١) الروبوتات أدواتٌ متعددة الاستخدامات. ولا ينبغي تصميم الروبوتات بصفة حصرية أو أساسية لقتل البشر أو إيذائهم، إلا في مصلحة الأمن القومي.

(٢) البشر هم المسئولون، وليس الروبوتات. ويجب تصميم الروبوتات وتشغيلها بالقدر المستطاع عمليًّا للامتثال للقوانين النافذة والحقوق والحريات الأساسية، بما في ذلك الخصوصية.

(٣) الروبوتات منتجات. ويجب تصميمها باستخدام عمليات تضمن سلامتها وأمنها.

(٤) الروبوتات أدوات من صُنع الإنسان. ولا ينبغي تصميمها بطريقة خادعة لاستغلال المستخدمين الضعفاء، بل يجب أن تتسم طبيعة الآلة الخاصة بهم بالشفافية.

(٥) يجب الرجوع إلى الشخص الذي يتولى المسئولية القانونية عن الروبوت.

الأهم من ذلك أن مشروع المبادئ الخمسة هذا يقلل من شأن السمات المميزة للروبوتات، ويركز بدلًا من ذلك على أن الروبوتات هي أدوات ومنتجات ومصنوعات يدوية يجب تصميمها وتشغيلها ضمن الأُطر القانونية وأُطر المعايير. المبدأ الرابع فقط هو الذي يتناول صراحةً صفة تنفرد بها (بعض) الروبوتات، وهي إنشاء روابط عاطفية أو اعتمادية بين الإنسان والروبوت، من خلال اقتراح عدم استغلال المصممين أو المصنعين لهذه العلاقات الاعتمادية، وضرورة أن يكون من الممكن دائمًا سحب الستارة جانبًا وكشف الروبوت تحتها، مثلما فعل توتو في فيلم «ساحر أوز» (ذا ويزارد أوف أوز).

الفصل الخامس

أسراب الروبوتات، والتطور، والتكافل

(١) أسراب الروبوتات

عندما نستخدم مجموعة من الروبوتات المتعددة لتعمل معًا لإنجاز مهمة ما بدلًا من روبوت واحد، فإنَّ هذا يُسمى بمجال أنظمة الروبوتات المتعددة. وعلى الرغم من أن فكرة أنظمة الروبوتات المتعددة ليست جديدة، لم تصبح الأنظمة التجارية متاحة إلا في السنوات الأخيرة. وخير مثال على ذلك هو نظام روبوتات المخازن «كيفا»، الذي وصفته الشركة بأنه «نظام استيفاء الطلبات ونقل البضائع إلى الإنسان».

تتسم روبوتات كيفا بالقوة، وهي تتنقل بعجلات، وتعمل بالبطاريات، ويبلغ عرضها ٦٠ سنتيمترًا، وطولها ٧٦ سنتيمترًا، وارتفاعها ٣٠ سنتيمترًا. ويوجد على السطح العلوي لكل روبوت من طراز كيفا، الذي يتميز باللون البرتقالي، لوحة رفع معدنية؛ حيث يمركز الروبوت نفسه أسفل وحدات أرفف التخزين التي يصل ارتفاعها إلى طول الإنسان، ثم يرفع وحدة التخزين فعليًّا بضعة سنتيمترات عن الأرض. إن حركة الرفع مثيرة للاهتمام. ذلك أنَّ آلية الرفع تستخدم محركًا لولبيًّا، يقوم بتدوير لوحة الرفع (تخيل حركة فك مسمار برغي)، وفي أثناء حدوث ذلك يدور الروبوت في الاتجاه المعاكس بالسرعة نفسها. وهذا يؤدي إلى الحفاظ على وحدة التخزين في وضع مستقيم وثابت خلال رفعها.

تتنقل روبوتات كيفا الفردية في جميع أنحاء المخزن باستخدام نظام شبكة الرموز الشريطية الثنائية الأبعاد الموجود على الأرض، وتُصمَّم حركة أسطول الروبوتات المتعددة بالكامل عن طريق كمبيوتر مركزي يتتبع مكان الروبوتات، ومكان المخزون، والمكان الذي يجب أن يُنقل إليه. تقوم الروبوتات، بصورة جماعية، بنقل العناصر المختلفة من المخزن إلى الإنسان، الذي يأخذها من وحدات الرفوف ويجهز الطلب الكامل. بعد ذلك، تُعاد وحدات الرفوف إلى المخزن. ومن المثير للاهتمام أنه بمرور الوقت، يحسن النظام

موضع وحدات الرفوف في المخزن، بحيث تصبح العناصر الأكثر شيوعًا قريبة من محطة التعبئة، مما يقلل من تكاليف الطاقة والوقت. إنه نظام مبتكَر يمثل أحدث ما توصَّلت إليه أنظمة الروبوتات المتعددة الواقعية.

يُعَد نظام روبوتات كيفا مثالًا على أنظمة الروبوتات المتعددة التي تتميز بالتحكم والتنسيق المركزيَّين. إنَّ أسراب الروبوتات تقدم نهجًا بديلًا يستغني عن التحكم المركزي. وبدلًا من ذلك، يتسم التحكم باللامركزية ويُوزع بين الروبوتات نفسها. ويُجسِّد هذا النهج المبادئ التي يقوم عليها ذكاء الأسراب.

(١-١) ذكاء الأسراب

فكِّرْ في تل النمل الأبيض. إنه بناء مُذهِل، وليس ذلك لحجمه مقارنةً بالكائنات الصغيرة الكفيفة التي بَنته فحسب، وإنما لمدى تعقيد هندسته المعمارية أيضًا، إضافةً إلى التحكم في درجة الحرارة والرطوبة، ووجود حدائق الفطريات، وغرف الحضانات. ما يُحيِّرنا هو كيف أنَّ حيوانات تبدو على المستوى الفردي غير قادرة على الإطلاق، وغير ذكية (نسبيًّا)، تستطيع التنسيق وتنظيم نفسها لبناء مثل هذا البناء الرائع وصيانته وإصلاحه. نحن البشر سنحتاج إلى مهندس معماري لتصميم البناء، ثم تسلسل هرمي من المخططين، والمهندسين المدنيين، وكبار العمال، والعمال، مع توجيه تعليمات لكلٍّ منهم بتنفيذ مهمة معينة في البناء الكلي، منسَّقة بعناية في المكان المناسب وفي الوقت المناسب.

غير أننا نعلم أنَّ النمل الأبيض ليس لديه مثل هذا التسلسل الهرمي. فلا يوجد نمل أبيض «مفكر» يوجه تعليمات لكل عامل بالمهمة التي يجب أن يؤديها. وبدلًا من ذلك، تمتلك كل نملة بيضاء مخزونًا من السلوكيات الغريزية البسيطة، يُحفز كلٌّ منها إثر حالة معينة؛ ربما تكون نتاج مادة كيميائية (مثل الفيرمون)، أو التفاعل مع نمل أبيض آخر، أو الاتصال الجسدي مع جزء من العش. ما من نملة بمفردها تمتلك خطة لكيفية بناء العش، فلا يمكنها بناء عش بمفردها مهما اجتهدت في ذلك. لكن بشكل جماعي، تحقق الآلاف من النمل الأبيض هذا الإنجاز الرائع للهندسة المدنية.

يُقال إن بناء تل النمل الأبيض وصيانته هي خاصية منبثقة من عدد كبير جدًّا من التفاعلات الدقيقة للنمل الأبيض بعضه مع بعض ومع بيئته المادية. ويُطلَق على نوع الذكاء الجماعي المنظم ذاتيًّا الذي يُظهره النمل الأبيض والحشرات الاجتماعية عمومًا

اسم «ذكاء الأسراب»، وتُسمى أنظمة الروبوتات المتعددة القائمة على المبادئ ذاتها أنظمة أسراب الروبوتات.

تتمثل الخصائص المميزة لأنظمة أسراب الروبوتات فيما يأتي: أولًا الاستشعار المحلي؛ بمعنى أنَّ كل روبوت لا يستشعر إلا بيئته المحلية؛ ثانيًا الاتصالات المحلية، حيث يتواصل كل روبوت محليًّا فقط مع أقرب جيرانه؛ وثالثًا الاستقلالية، حيث يُقرِّر كل روبوت بنفسه الإجراء الذي يجب اتخاذه بالاعتماد على الاستشعار والاتصالات المحلية فقط.

غالبًا ما تكون الروبوتات الموجودة في سِربٍ ما متشابهة، والأهم من ذلك أنها تعمل ببرنامج التحكم ذاته. معنى هذا أنها تتمتع بمجموعة متطابقة من السلوكيات المدمجة. وبناءً على هذا، ففي نظام سرب الروبوتات، لا يوجد تسلسل هرمي، ولا قائد محدد سلفًا (على الرغم من احتمالية ظهور أحدهم، ربما مؤقتًا)، ويُوزع التحكم بالكامل بين روبوتات السرب.

في علم الروبوتات، تتمتع أنظمة الأسراب بسحر خاص. فهي، من وجهة نظر علمية، مثيرة للاهتمام بوصفها نماذج عملية لذكاء الأسراب، وليس من المستغرَب أن يعمل بعض علماء الأحياء مع علماء الروبوتات لمحاولة اكتشاف كيفية عمل «مجتمعات» الحشرات؛ ويُعد التقسيم التكيفي للعمل في أثناء بحث مستعمرات النمل عن الطعام من الأمثلة الجيدة لمشكلة خضعت للدراسة باستخدام الروبوتات. وهنا يظهر السؤال الآتي: عند وجود كمية معيَّنة من «الطعام» في البيئة، كيف يوازن السرب تلقائيًّا بين عدد الروبوتات التي تجمع الطعام وبين عدد الروبوتات التي تبقى في العش للحفاظ على الطاقة، من أجل تحسين طاقة السرب الإجمالية؟ (إذا كان الطعام قليلًا وخرجت جميع الروبوتات للبحث عنه — وهو نشاط يستهلك قدرًا كبيرًا من الطاقة — فستنفد طاقة السرب؛ من ناحية أخرى، إذا بقيت جميع الروبوتات في العش لتوفير الطاقة، فستتضوَّر المستعمرة جوعًا في نهاية الأمر.) ليس من السهل حل هذه المشكلة عندما لا تكون الروبوتات الفردية على دراية شاملة بكمية الطعام المتاحة التي يمكن جمعها، أو إجمالي مستوى طاقة السرب.

ليست هذه بالمرة الأولى في علم الروبوتات التي تتداخل فيها الهندسة وعلم الأحياء بقوة في ذكاء الأسراب. ولكن من وجهة نظر هندسية، يُعتبر سرب الروبوتات أيضًا أمرًا جذابًا للغاية. وأحد أسباب هذا هو القوة. فلسِرب الروبوتات قدرةٌ عالية على تحمُّل حدوث الأعطال. وإذا حدث عطل في بعض الروبوتات في السرب، فستُكمِل الروبوتات المتبقية المهمة بصفة مبدئية. قد يستغرق الأمر وقتًا أطول، لكن المهمة ستُنجَز في النهاية. ومن الأسباب الأخرى لقوة السرب، عدم وجود كمبيوتر تحكم مركزي، أو شبكة اتصال مع

الروبوتات، يمكن حدوث عطل بهما. ويُعتبر نهج السرب جذابًا أيضًا بسبب قابليته للتوسع. تخيل سربًا من الروبوتات يقوم بعملية تنظيف. إذا أردت إنجاز المهمة في وقت أقل، فما عليك من حيث المبدأ سوى إضافة المزيد من الروبوتات. (لن ينجح هذا إلا في حالة وجود مساحة كافية لتعمل بها الروبوتات؛ أما إذا بدأت في اعتراض طريق بعضها بعضًا، فستضيع ميزة إضافة المزيد من الروبوتات.)

(١-٢) التطبيقات الواقعية المحتملة

تُخصَّص العديد من تطبيقات الروبوتات الواقعية للمهام الموزَّعة مكانيًّا. منها على سبيل المثال، الاستكشافات الروبوتية ومسح الأراضي والمراقبة البيئية والبحث والإنقاذ؛ كل ذلك يتطلب روبوتات لتغطية مساحة فعلية كبيرة، ولا شك أن توزيع عدد من الروبوتات على تلك المساحة يمكن أن يؤدي إلى تغطية المنطقة في وقت أقل بكثير مما يستغرقه روبوت واحد. وينطبق الشيء ذاته على الروبوتات الزراعية أو البستانية، وعلى روبوتات التنظيف الصناعي أو روبوتات جمع النفايات. ضع في اعتبارك أيضًا الروبوتات الطبية الدقيقة المستقبلية التي يمكن حقنها في مجرى الدم؛ من المرجَّح أن تتطلب هذه المهمة العديد، وربما الآلاف، من الروبوتات المجهرية. وكل هذا من التطبيقات المحتملة لأنظمة أسراب الروبوتات.

يوجد في حقيقة الأمر تشبيهٌ مفيد جدًّا لجميع هذه التطبيقات المحتملة للروبوتات الجماعية، وهو التنقل بحثًا عن الطعام. فنحن نفكر في عملية التنقل بحثًا عن الطعام على أنها عملية لجمع الطعام فحسب، لكن يمكننا تعميم الفكرة لتشمل البحث عن أي شيء، وجمعه، وإعادته، بما في ذلك المعلومات. لذلك أصبح التنقل بحثًا عن الطعام مسألة معيارية في أسراب الروبوتات، ويمكن تطبيق خوارزميات البحث عن الطعام على أيٍّ من التطبيقات الواقعية المذكورة أعلاه، مع إدخال التعديلات المناسبة لتلائم المهمة الفعلية.

(١-٣) دراسة حالة: سوارم-بوت

قدَّم مشروع سوارم-بوت، بقيادة عالم الروبوتات ماركو دوريجو، عرضًا مختبريًّا رائعًا لأسراب الروبوتات في سيناريو للبحث والإنقاذ. فقد كانت الروبوتات الفردية، المسماة إس-بوتس، تبحث عن ناجين. وبعد ذلك يعثر واحد أو اثنان من الروبوتات إس-بوتس على طفلة. تتميز الروبوتات إس-بوتس بأنها مزوَّدة بقابض للإمساك بملابس الطفلة،

ولكنها لا تستطيع جر الطفلة إلى بر الأمان؛ لأن الروبوتات في حد ذاتها صغيرة جدًّا وخفيفة الوزن، حيث يبلغ قُطرها حوالَي ١٢ سنتيمترًا، ووزنها ٦٦٠ جرامًا. ولذلك ترسل الروبوتات إس-بوتس التي عثرت على الطفلة وأمسكت بملابسها الإشارات للروبوتات الأخرى للانضمام إليها. وسرعان ما تصل الروبوتات إس-بوتس الأخرى من السرب إلى الطفلة، لكن حينها تظهر مشكلة أخرى. فنظرًا لحجم الطفلة والروبوتات إس-بوتس، لا يسمح المجال إلا بوجود أربعة روبوتات فقط لتتمكن من الإمساك بملابس الطفلة بقوابضها. وحتى أربعة روبوتات من نوع إس-بوتس ليست قوية بما يكفي لتتمكن من سحب الطفلة؛ لذلك تستخدم الروبوتات الحرة المتبقية قوابضها للإمساك بالروبوتات التي تمسك الطفلة بالفعل، وسرعان ما تنظم نفسها في أربع سلاسل من الروبوتات. وبعد فترة من الوقت، تصبح كل سلسلة طويلة بما يكفي للحصول على قوة جر كافية، وتُجَر الطفلة فعليًّا إلى بر الأمان. يُعرَف سرب الروبوتات إس-بوتس بشكل جماعي باسم سوارم-بوت.

يوضح سوارم-بوت الذي يجذب الطفلة عددًا من الخصائص المهمة لأنظمة أسراب الروبوتات. الخاصية الأولى أنَّ هذه الأنظمة تحتاج عادةً إلى أكثر من روبوت فردي لإكمال المهمة. فقد استلزم العرض التوضيحي الذي أشرت إليه ثمانية عشر روبوتًا من نوع إس-بوت. وإذا كان الحد الأدنى المطلوب هو ثمانية عشر روبوتًا، فإن حدوث عطل في روبوت واحد من شأنه أن يضر بالمهمة. ولهذا فعادةً ما تستخدم أنظمة أسراب الروبوتات ما يزيد عن الحد الأدنى لعدد الروبوتات لتوفير بديل في حالة حدوث عطل في بعض الروبوتات. ولا تمثل هذه الزيادة أي مشكلة. إنها ميزة في واقع الأمر. على سبيل المثال، إذا كان مثال جذب الطفلة يحتوي على ٢٤ روبوتًا بدلًا من ثمانية عشر روبوتًا، فستتمكن الروبوتات بشكل جماعي من البحث بشكل أسرع وإنقاذ الطفلة في وقت أقل، بينما تظل قادرة على تحمل حدوث عطل فيما يصل إلى ستة روبوتات. فمن الصعب للغاية تصميم روبوت واحد قادر على تحمل حدوث أعطال فيما يعادل ٢٥ بالمائة من أنظمته الفرعية.

الخاصية الثانية أنَّ الروبوتات في السرب بحاجة إلى أن تكون قادرة على التعاون وتنسيق أفعالها والعمل كفريق واحد. وفي هذا المثال، يجب أن تتواصل الروبوتات معًا حتى تتمكن من الاتفاق على العدد الذي سيكفي عند الوصول إليه لأن تكون قادرة على سحب الطفلة، ثم التحرك في وقت واحد حتى تبدأ جميعها في السحب في الوقت ذاته وفي الاتجاه ذاته.

يوضح هذا المثال ميزةً أخرى لأنظمة أسراب الروبوتات، وهي أن الروبوتات الفردية في النظام عادةً ما تكون أصغر (وربما أبسط) مما سيكون عليه روبوت واحد مخصص لإنجاز المهمة ذاتها. تخيلْ مدى ضخامة حجم روبوت واحد لإنقاذ طفل. عادةً ما يكون كلٌّ من الروبوتات الأصغر والأبسط أكثر موثوقيةً من الروبوت الفردي المكافئ لإنجاز المهمة ذاتها.

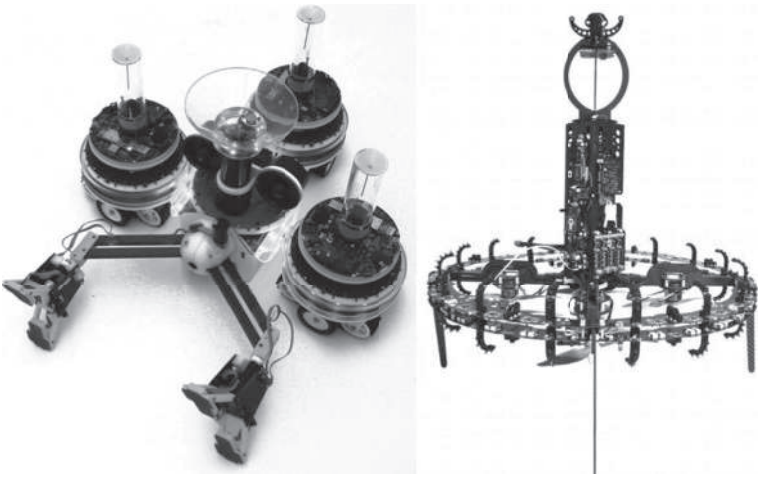
(١-٤) دراسة حالة: سوارمنويد

تُعَد دراسة حالة سوارم-بوت المذكورة سابقًا مثالًا على النظام المتجانس؛ لأن روبوتات (إس-بوتس) الفردية كلها متطابقة. بالرغم من ذلك، فليس من الضروري أن تكون الروبوتات الموجودة في السرب متطابقة. ففي النظام المتباين، سنجد عدة أنواع مختلفة من الروبوتات، لكلٍّ منها تخصص وظيفي مختلف. وهذا يعطي النظام ككلٍّ مزيدًا من المرونة للقيام بمجموعة أكبر من المهام، مع الحفاظ على متانة السرب، إضافةً إلى بساطة الروبوتات الفردية نسبيًّا؛ ومن ثَم موثوقيتها.

يُوضِّح الشكل ٥-١ الأنواع الثلاثة المختلفة من الروبوتات التي تشكل روبوتات سوارمنويد، وتُسمَّى فوت-بوت وهاند-بوت وآي-بوت. ويُعتبر مشروع سوارمنويد، بقيادة ماركو دوريجو أيضًا، خليفة لمشروع سوارم-بوت؛ ولهذا ليس من المستغرَب أن يكون فوت-بوت هو النموذج المطور لروبوتات إس-بوتس التي وصفتها سابقًا. فروبوتات فوت-بوت تسير على الأرض، وتستطيع التحرك فرديًّا وكفريق واحد أيضًا عندما تتصل بعضها ببعض من خلال قوابضها. لكنها تقتصر بالطبع على العمل الثنائي الأبعاد، القريب من الأرض.

بالنسبة إلى روبوت هاند-بوت، فهو مختص بالإمساك بالأشياء. الروبوت غير مزوَّد بعجلات خاصة به، ويجب أن تحمله روبوتات فوت-بوت، كما هو مُوضَّح في الشكل ٥-١. بالرغم من ذلك، لا يقتصر هاند-بوت على العمل بالقرب من الأرض. فهو يحتوي على جهاز — يُسمى نظام التعلق بالسقف — يمكِّنه من توصيل سلك إلى السقف، ثم تسلق السلك لالتقاط الأشياء الموجودة بين الأرضية والسقف. وفي أثناء تَدلِّيه من السلك، يمكن للروبوت هاند-بوت التحكم في اتجاهه باستخدام مروحتين.

أما الروبوت الثالث، آي-بوت، فهو روبوت طائر رباعي المراوح. ولهذا، يمكن لآي-بوت أن يتحرك في مساحة ثلاثية الأبعاد، وتتمثل وظيفته في توفير «رؤية فوقية»



شكل ٥-١: روبوتات سورامنويد. على اليسار: ثلاثة روبوتات فوت-بوت وروبوت هاند-بوت. وعلى اليمين: روبوت آي-بوت

للنظام ككلٍّ؛ ومن ثَم السماح لروبوتات فوت-بوت وهاند-بوت بتنسيق أفعالها والعمل كفريق واحد. وعلى غرار هاند-بوت، يحتوي آي-بوت أيضًا على جهاز للتعلق بالسقف؛ مما يعني أنه يستطيع «الوقوف» على السقف لتوفير وضع ثابت مستقر للكاميرا، مع الحفاظ على طاقة البطارية. وفيما كان على الأرجح أول عرض في العالم لتعاون نظام من أسراب الروبوتات المتباينة لتحقيق مهمة معقَّدة ثلاثية الأبعاد، نسَّق آي-بوت العمل بين مجموعة من روبوتات فوت-بوت وهاند-بوت لتحديد موقع كتاب وإحضاره من رف كتب مرتفع.

لقد سلطت الضوء حتى الآن على مزايا أنظمة أسراب الروبوتات، ولكن ما الجوانب السلبية؟ يتمثل الجانب الأول في شدة صعوبة تصميمها، وإن كان ذلك ليس جانبًا سلبيًّا إلى حد كبير، بل نتيجة بسيطة للطبيعة المعقدة الواضحة لأنظمة الروبوتات الجماعية. وحتى لو كان نظام الروبوتات الجماعية يحتوي على نوع واحد فقط من الروبوتات، كما هو الحال في مثال سوارم-بوت الذي يجذب الطفلة، فإن تصميم الأنظمة التي تُنسِّق الروبوتات لكي تُنفِّذ المهام المطلوبة منها يُمثِّل صعوبةً خاصة (ومن ثَم أهمية خاصة).

يَكمُن الجانب السلبي الآخر في مشكلة كيفية تحكم البشر في السرب ومراقبتهم له. فصحيح أنَّ أنظمة أسراب الروبوتات عادةً ما تُصمَّم بمستوًى عالٍ من الاستقلالية، لكن حتى أنظمة الروبوتات العالية الاستقلالية تحتاج إلى وسيط بشري. وعلى أقل تقدير، سيسمح هذا للمشغلين البشر بالتحكم في السرب لتحقيق بعض الأهداف العالية المستوى ومراقبة تقدمه، مع إمكانية الاختيار بين تغيير أهداف المهمة أو إلغائها تمامًا إذا حدث خطأ ما.

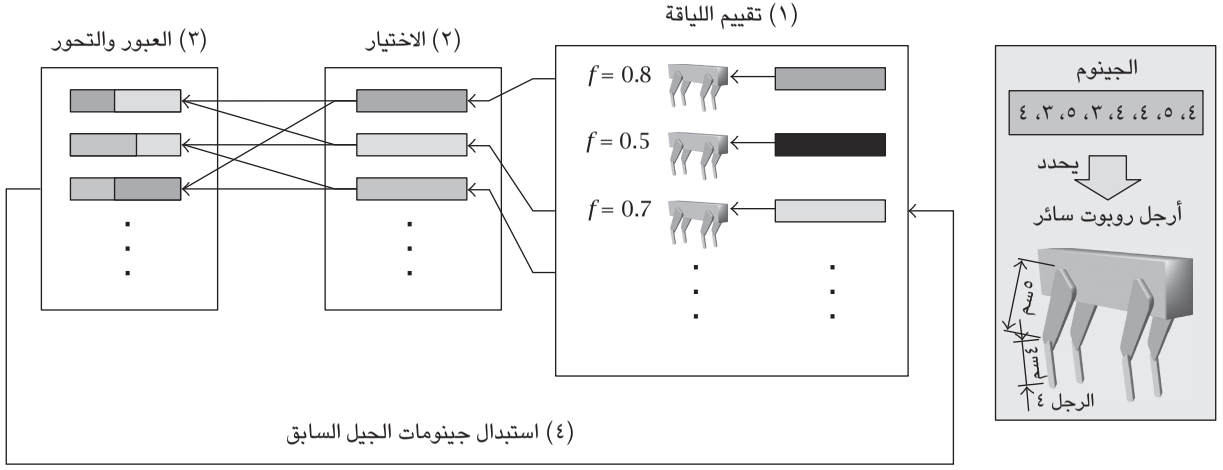
(٢) الروبوتات التطورية

تُعَد الروبوتات التطورية واحدة من أروع التطورات في أبحاث الروبوتات في العشرين عامًا الماضية. ذلك أنها طريقة جديدة تمامًا لتصميم الروبوتات. تتمثل هذه الطريقة في استخدام عملية آلية تعتمد على الانتخاب الاصطناعي الداروينى لتصميم روبوتات جديدة. وبطبيعة الحال، فإن الاستيلاد الانتقائي، كما يُمارَس في الزراعة على يد البشر لإنتاج أنواع محسنة جديدة من المحاصيل أو حيوانات المزرعة، أمرٌ مستحيل بالنسبة للروبوتات الحقيقية، في الوقت الحالي على الأقل. وبدلًا من ذلك، تستخدم الروبوتات التطورية نسخة مجرَّدة من الانتخاب الاصطناعي حيث تحدث معظم العملية داخل كمبيوتر. ويُطلَق على هذه العملية المجردة اسم الخوارزمية الجينية.

تعمل عملية الروبوتات التطورية على النحو الآتي. في البداية، نُمثِّل الروبوت الذي نريد تطويره بجينوم اصطناعي. وعلى غرار الحمض النووي، يحتوي الجينوم الاصطناعي على سلسلة من الرموز، لكنه يختلف عن الحمض النووي في أنَّ كل رمز منه يُمثِّل (أو «يُشفِّر») جزءًا من الروبوت مباشرةً. ففي الروبوتات التطورية نادرًا ما نطور كل جزء من أجزاء الروبوت.

لنتخيل كيف يمكننا بناء جينوم لروبوت يمشي على أربع أرجل. تنقسم كل رجل إلى جزأين، ويُحدِّد الجينوم طول كل جزء. ونظرًا لوجود أربع أرجل، يحتوي الجينوم إجمالًا على ثماني قيم. يُوضِّح المربع الموجود على اليسار في الشكل ٥-٢ الجينوم الذي يُحدِّد مواصفات أرجل روبوت سائر.

توجد بالطبع العديد من الأبعاد الأخرى للروبوت التي يمكننا أيضًا تشفيرها في الجينوم الاصطناعي. يمكننا على سبيل المثال، أن نشفر في الجينوم حجم جذع الروبوت، أو مواضع المفاصل بين الجذع والأرجل، أو عدد الأجزاء في كل رجل، وما إلى ذلك. ومن



شكل ٥-٢: عملية الروبوتات التطورية ذات المراحل الأربعة

الناحية النظرية، يمكننا تشفير كل مكونات الروبوت في الجينوم، لكن هذا سيؤدي إلى إبطاء عملية التطور الاصطناعي، وسيقلل أيضًا من احتمالية تطويرنا لروبوت «جيد». ولهذا، ما نفعله عمليًّا أننا نُصمِّم بعض مكونات الروبوت ونُصلحها يدويًّا، ونُحدِّد الأجزاء التي نريد تطويرها؛ ومن ثَم نُشفِّر تلك الأجزاء فحسب في الجينوم الاصطناعي.

بعد تحديد بنية الجينوم الاصطناعي، نُنشئ في برنامج كمبيوتر مجموعةً من الجينومات. ليس من الضروري أن يكون عدد الجينومات كبيرًا؛ فيكفي أن يتراوح العدد من عشرة إلى مائة للحفاظ على درجة من التنوع الجيني. وبصورة عامة، تُهيَّأ الجينومات في المجموعة الأولية عشوائيًّا. وبالنسبة إلى الروبوت الخيالي السائر على أربع أرجل، فإن هذا يعني أن المجموعة الأولية ستتألف من روبوتات بأحجام أرجل غير متطابقة، وكثير منها لن ينجح في السير.

يُوضِّح الشكل ٥-٢ عملية التطور الاصطناعي الشاملة المكوَّنة من أربع مراحل. وفي كل مجموعة، يخضع كل نموذج روبوت — ممثَّلًا بالجينوم الخاص به — لتقييم لياقة منفصل. ويظهر هذا في الشكل ٥-٢ تحت مُسمى (١) «تقييم اللياقة»، وهذا يعني أن كل جينوم يُستخدم لتصميم روبوت. غير أنه سيكون من غير العملي إلى حد كبير تصميمُ روبوت مادي حقيقي لكل جينوم؛ ولهذا نُصمِّم محاكاة للروبوت في جهاز كمبيوتر.

بعد ذلك، تخضع محاكاة الروبوت للاختبار. بمعنًى آخر، يُقاس أداؤه وفقًا لبعض معايير اللياقة. وبالنسبة إلى الروبوت السائر على أربع أرجل، يُعتبر الروبوت ناجحًا إذا تمكَّن من السير في خط مستقيم، وكلما استقام الخط وزادت سرعة المشي، زادت نسبة نجاح الروبوت (أي «لياقته»). وبعد اختبارات اللياقة، يحصل كل نموذج في المجموعة على قيمة للياقة. في الشكل ٥-٢ تظهر هذه القيم في شكل $f = 0.8$، وما سواها. والقيمة الأعلى تعني مستوًى أعلى من اللياقة.

تُستخدم قيم اللياقة بعد ذلك لاختيار النماذج التي سيُعاد إنتاجها، كما هو مُوضَّح في المرحلة (٢) «الاختيار» في الشكل ٥-٢. في هذا المثال، يجري اختيار النموذجين اللذين يتمتعان بقيم اللياقة $f = 0.8$ و$f = 0.7$. لم يقع الاختيار على النموذج ذي القيمة المنخفضة $f = 0.5$. توجد العديد من استراتيجيات الاختيار التي يمكننا استخدامها. على سبيل المثال، قد نختار نصف نماذج المجموعة التي تتمتع بنسب لياقة مرتفعة. وسوف ينتج هذا النصف بعد ذلك المجموعة التالية.

حينئذٍ يُنشأ الجيل التالي، كما هو مُوضَّح في المرحلة (٣) «العبور والتحور» في الشكل ٥-٢. ومرةً أخرى، ثَمة طرق كثيرة يمكننا القيام بذلك من خلالها (تذكر أنَّ هذه محض

أرقام في الكمبيوتر)؛ من هذه الطرق التكاثر اللاجنسي، حيث يمكننا إنتاج نسختين لكل نموذج ناجح، كل نسخة متحورة قليلًا. والتحور هنا يعني ببساطة أن كل قيمة من القيم الموجودة في الجينوم الاصطناعي (أو بعضها) تُعدَّل بنسبة صغيرة تُختار عشوائيًّا.

ثَمة نهجٌ آخر يتمثل في أخذ أزواج من النماذج اللائقة من المرحلة (٢) والتبديل بين أجزاء من الجينوم الخاص بها لإنتاج سلالة جديدة، كما هو مُوضَّح في الشكل ٥-٢. يحتوي كل جينوم جديد على جزأين، جزء من جينوم كل «والد». وتُسمى عملية التبديل بالعبور، وهي تشبه عملية التكاثر الجنسي على نحو مجرد. وبصرف النظر عن الاستراتيجية المتبَعة للاختيار والتكاثر والتحور، يُنشأ الجيل التالي (الذي يحافظ على نفس حجم المجموعة) وتحل هذه المجموعة الجديدة من الجينومات محل جينومات الجيل السابق، في المرحلة (٤) من الشكل ٥-٢.

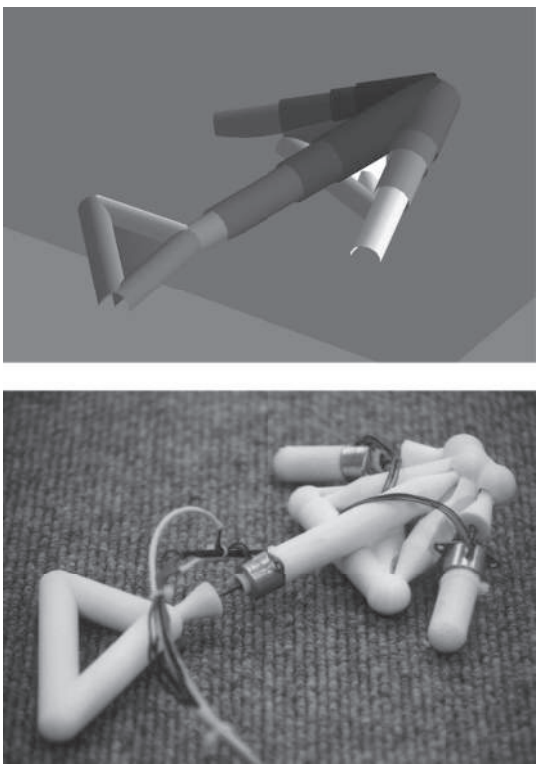
تخضع النماذج («الأبناء») في هذه المجموعة الجديدة لاختبارات اللياقة، بالطريقة نفسها وباستخدام معايير اللياقة ذاتها. وتتكرر هذه العملية برُمَّتها، ربما على مدى مئات الأجيال، حتى نُطوِّر روبوتًا ينجح في تحقيق الأداء المطلوب. بمعنًى آخر، نتوقف بعد المرحلة (١) عندما ينتج جينوم ما روبوتًا بلياقة تتجاوز قيمة f المختارة. وبعد ذلك، نصمم نسخةً حقيقية من الروبوت الفائز؛ وبهذا تكتمل العملية.

(٢-١) تطور أجسام الروبوتات

في مشروع جولم البارز، طوَّر هود ليبسون وجوردان بولاك روبوتات جديدة غريبة، قادرة على التحرك بمفردها على سطح مستوٍ. يُوضِّح الشكل ٥-٣ أحد الروبوتات المتطورة: في الجزء العلوي الروبوت الافتراضي الأكثر نجاحًا في عالمه الافتراضي، وفي الجزء السفلي الروبوت الحقيقي المصنوع بنفس المواصفات باستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد، مع إضافة محركات.

على عكس الروبوت الخيالي السائر على أربع أرجل، أتاح ليبسون وبولاك للعملية التطورية قدرًا أكبر من الحرية لتطور شكل جسم الروبوت. فلم يُقرِّرا سوى أن الروبوتات ستُصنَع من عدد من الأجزاء، بعضها له طول ثابت، وبعضها الآخر قادر على التقلص أو التمدد بتداخل الأجزاء بعضها داخل بعض. وتتقلص هذه الأجزاء المتحركة، وتتمدد بمعدل ثابت، وتعمل كشكل من أشكال عضلات الروبوت التي تُثنى وتُفرد باستمرار. وكانت العملية التطورية حرة في تغيير عدد الأجزاء وطولها وأماكن توصيلها والزوايا التي

تتخذها عند الاتصال. واستند تقييم اللياقة ببساطة إلى المسافة التي يمكن أن تقطعها الروبوتات (إذا تحركت على الإطلاق) من موضع البداية في وقت محدَّد. وقد وقع الاختيار على الروبوتات التي انتقلت إلى أبعد نقطة، وأصبحت هي آباء الجيل القادم.



شكل ٥-٣: في مشروع جولم، يتطور الروبوت في المحاكاة (بالأعلى)، ثم يُصنَّع النموذج النهائي الأفضل (بالأسفل)

نجح مشروع جولم في تطوير عدد من الروبوتات التي لديها القدرة على التحرك بمفردها على السطح. وتتمتع جميعها بأشكال أجسام غريبة ومدهشة في بعض الأحيان، حتى يكاد يكون من المؤكَّد أنها ليست تصميمات قد يبتكرها مهندس بشري. وقد اكتشفت الخوارزمية الجينية طرقًا للتحرك مدهشة بالقدر ذاته، استغلت فيها كلًّا من حركة أجزاء

«العضلات» والاحتكاك بين أجزاء الجسم الملامسة للأرض، والأرض ذاتها. وتنشأ الحركة من التفاعل المعقَّد نوعًا ما بين أجزاء جسم الروبوت وسطح الأرض، مع مراعاة فيزياء الكتلة والاحتكاك؛ لذلك سيكون من الصعب جدًّا التنبؤ بكيفية تحرك هذه الروبوتات دون تجربتها في العالم الافتراضي.

كان من المثير للدهشة أيضًا أن بعض أجسام الروبوتات المتطورة، بما في ذلك الجسم الموضَّح في الشكل ٥-٣، متناظرة، مثل معظم الحيوانات. ولم يكن التناظر من العناصر التي يكافئ عليها تقييم اللياقة؛ لذا ربما يعكس ظهوره حقيقة أن الروبوتات المتماثلة من المرجَّح أن تتحرك في خط مستقيم؛ ومن ثَم فإنَّ المسافة التي تقطعها من موضع البداية أطول مما تقطعه الروبوتات غير المتناظرة. لذا فإنَّ تناظر الجانبين الذي نراه هنا — أي وجود جانب أيسر يشبه تمامًا الجانب الأيمن — لم يكن سوى أثر جانبي للتطور. ومن السهل أن نتخيل مخلوقات تشبه هذه الروبوتات تزحف عبر قاع بحار العصر الكمبري.

(٢-٢) تطور عقول الروبوتات

في مشروع جولم، نُفذت العملية التطورية بأكملها في جهاز كمبيوتر، بما في ذلك تقييم لياقة الروبوتات الافتراضية في العالم الافتراضي. وعلى الرغم من نجاح النهج القائم على المحاكاة لتطوير الروبوتات في هذا المشروع، فهو ينطوي على تحديات. تكمن المشكلة الكبرى في أن برنامج المحاكاة المستخدَم لإجراء اختبارات اللياقة يحتاج إلى أن يكون قادرًا على محاكاة خصائص كل جزء من أجزاء الروبوت والعالم التجريبي بدقة. ومثلما أكدت على مدار هذا الكتاب، فنظرًا لأن سلوك الروبوت ينتج عن التفاعلات بين الروبوت وعالمه، يجب محاكاة هذه التفاعلات واقعيًّا (انظر المربع ٣).

في حالة وجود اختلاف بين أي جانب من جوانب الروبوت الافتراضي وساحة الاختبار الخاصة به، وبين الروبوت الحقيقي وساحة الاختبار الحقيقية، فمن غير المرجَّح أن يعمل الروبوت المتطور عند تصميمه واختباره فعليًّا بالجودة نفسها التي عمل بها في المحاكاة. تُعرَف المشكلة في علم الروبوتات التطورية باسم «فجوة الواقع»، وهي مشكلة صعبة لكن حلها غير مستحيل. ونظرًا لأنَّ مزايا النهج القائم على المحاكاة كبيرة بما فيه الكفاية، يُوجَّه قدر كبير من الجهد والإبداع للتغلب على فجوة الواقع.

طوَّر مشروع جولم أجسام الروبوتات، لكنه لم يطور «عقولها»؛ أي إنَّ أنظمة التحكم في الروبوت كانت ثابتة؛ متمثلةً في الثني الدوري المستمر لأجزاء «عضلات» الروبوت. وإذا

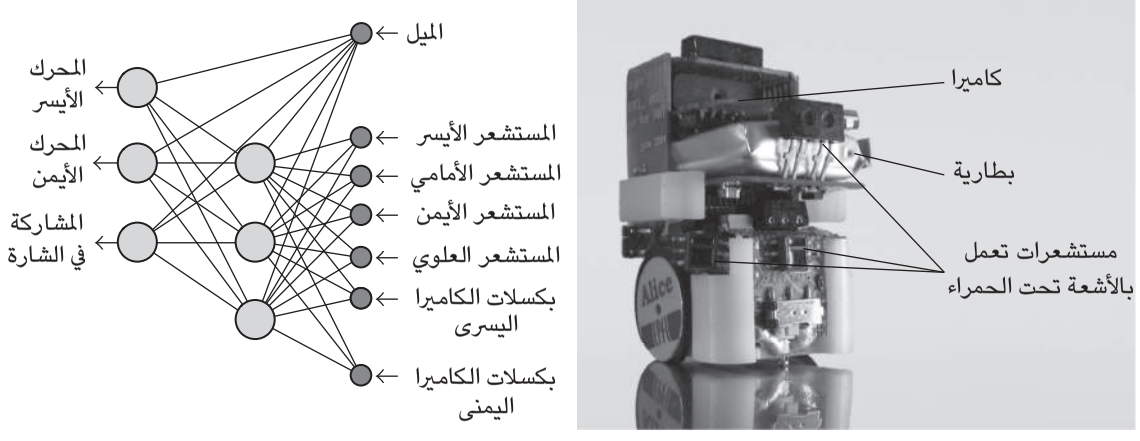
أردنا تطوير نظام التحكم في الروبوت، فإن مشكلة فجوة الواقع تصبح أكثر حدة، وقد تبنَّى علماء الروبوتات التطوريون نهجًا مختلفًا لمعالجتها.

يتمثل هذا النهج في تصميم جسم الروبوت بالكامل يدويًّا؛ ومن ثَم جعل تصميم جسد الروبوت بأكمله ثابتًا، وتطوير نظام التحكم الخاص بالروبوت فقط. في هذه الحالة، لا يُشفِّر الجينوم إلا نظام التحكم في الروبوت؛ مما يعني أنه يمكن إجراء جميع اختبارات اللياقة باستخدام الروبوت المادي ذاته؛ أي روبوت مادي واحد في واقع الأمر. وتظل العملية بشكل أساسي على ما هي عليه كما هو مُوضَّح في الشكل ٥-٢. الاختلاف الوحيد هو أنه في المرحلة (١) «تقييم اللياقة»، يُستخدم كل جينوم لإنشاء نظام تحكم جديد، يُنزَّل بعد ذلك على روبوت حقيقي في ساحة اختبار حقيقية. ويجب القيام بذلك لكل جينوم في كل جيل؛ لذا فهي عملية تستغرق وقتًا طويلًا. فمجموعة بها عشرون روبوتًا، تطورت لمئة جيل على سبيل المثال، ستتطلب ٢٠٠٠ اختبار لياقة منفصل. لكن الميزة هي أن قيم اللياقة f ستعتمد على الروبوت الحقيقي الواقعي؛ مما سيُجنِّبنا مشكلة فجوة الواقع تمامًا.

في مثال رائع لهذا النهج، استخدم ماركوس وايبل وداريو فلوريانو ولوران كيلر الروبوت المصغر بحجم مكعب السكر «أليس» لتطوير الروبوتات التي تتسم بسلوكيات تعاونية وإيثارية. يُوضِّح الشكل ٥-٤ كلًّا من الروبوت الفعلي ونظام التحكم الخاص به.

في هذه التجربة، تُمثِّل وحدة التحكم في الروبوت شبكة عصبية اصطناعية، كما هو مُوضَّح في الشكل ٥-٤(ب). والشبكة العصبية الاصطناعية هي نموذج مبسَّط للغاية من الخلايا العصبية الحيوية. لكل خلية عصبية اصطناعية مدخلاتٌ متعددة ومخرجٌ واحد؛ وتُحسَب قيمة خرج الخلية العصبية الاصطناعية بالمجموع المرجح لقيم المدخلات، وتمثل الأوزان «نقاط قوة» مدخلات الخلية العصبية. («الوزن» قيمة مضاعفة. ومن ثَم، إذا كانت قيمة الإدخال ٢، والوزن ٠٫٥، فإن القيمة المرجحة هي ٢ × ٠٫٥ = ١.) للشبكات العصبية الاصطناعية أهميةٌ كبيرة في علم الروبوتات لا سيما في الروبوتات التطورية؛ وذلك لأننا نستطيع تشفير أوزان كل مدخل لكل خلية عصبية في الجينوم الاصطناعي، ثم نطور، بالطريقة التي وصفتها، شبكة عصبية اصطناعية للروبوت.

يُوضِّح الشكل ٥-٤ كيفية توصيل الشبكة العصبية الاصطناعية بمستشعرات إدخال ومحركات خرج للروبوت «أليس». وفي هذا المثال، تحتوي الشبكة العصبية الاصطناعية على إجمالي ست خلايا عصبية، تظهر على شكل دوائر باللون الرمادي الفاتح. وتتصل



شكل ٥-٤: الروبوت أليس (أ) ووحدة التحكم في الشبكة العصبية الاصطناعية الخاصة به (ب)

المدخلات الموجودة على الجانب الأيسر — الدوائر السبعة الصغيرة ذات اللون الغامق — مباشرة بمستشعرات الروبوت، وهي في هذه الحالة أربعة مستشعرات تعمل بالأشعة تحت الحمراء وكاميرتان. ويتصل اثنان من الخلايا العصبية على الجانب الأيمن، بالمخرج مباشرة من خلال محركَي الروبوت الموجودين على الجانب الأيسر والأيمن. ويُعتبر كل خط من خطوط الربط السوداء مدخلًا مرجحًا لخلية عصبية، وهذه الأوزان هي التي تتطور.

عند مقارنة الشكل ٥-٤ مع الشكل ١-٢ في الفصل الأول، ستلاحظ أن الشبكة العصبية الاصطناعية قد حلَّت تمامًا محل «دماغ» وحدة التحكم الدقيقة للروبوت. ففي هذه الحالة، يمتلك الروبوت، بمعنًى أكثر حرفية، «جهاز عصبي مركزي» يحاكي الأنظمة العصبية الحيوية بشكل مباشر، وإن كان ذلك بطريقة مبسَّطة للغاية.

في تجربة وايبل وفلوريانو وكيلر، تحاكي عشرة روبوتات من نوع «أليس» سلوك البحث عن الطعام من خلال البحث عن الشارات المادية والتقاطها، ثم نقلها إلى منطقة «العش». وقد احتوت الساحة التجريبية على نوعين من الشارات: شارات صغيرة يمكن دفعها عن طريق روبوت واحد، وشارات أكبر حجمًا جدًّا يتعذر على روبوت واحد دفعها بمفرده بسبب ثقل حجمها. واستندت لياقة كل روبوت إلى نجاحه في البحث عن الشارات. وفي إحدى التجارب، احتوت الساحة على شارات كبيرة فقط، ونجحت الروبوتات في تطوير القدرة على دفع هذه الشارات بشكل تعاوني إلى العش.

بالرغم من ذلك، عندما احتوت الساحة على كلا النوعين من الشارات كبيرة وصغيرة، أثَّر «هيكل القرابة» بالمجموعة، أي الارتباط الجيني للروبوتات، على السلوكيات المتطورة. وتطورت مجموعات من الروبوتات غير المرتبطة جينيًّا نحو دفع الشارة الصغيرة لأنها كانت الطريقة الفُضلى لزيادة لياقتها الخاصة. وفي المقابل، طورت الروبوتات المرتبطة جينيًّا سلوكيات إيثارية، وتعاونت لدفع الشارات الكبيرة على حساب لياقتها الفردية. ومن اللافت للنظر أن هذه التجربة يبدو أنها تؤكد قاعدة هاميلتون، حيث تتطور السلوكيات الإيثارية عندما يكون حاصل ضرب الترابط بين الروبوتات الفردية وفوائد اللياقة التي تعود على متلقِّي السلوك الإيثاري أكبر من تكلفة اللياقة لتأدية السلوك.

(٣) الكائنات الروبوتية التطورية التكافلية

تخيل مجموعة من الروبوتات المرسَلة إلى مبنًى منهار للبحث عن ناجين (ربما تكون مزوَّدة بشوارب اصطناعية مثلما رأينا في الفصل الثالث). الروبوتات صغيرة ومتنقلة.

ويُعتبر حجمها الصغير ميزة بالطبع؛ لأنه يمكِّنها من الوصول إلى المساحات الصغيرة، ويمكِّن عددًا كبيرًا من الروبوتات المتنقلة الصغيرة من البحث في المبنى بسرعة. لكنه مبنًى منهار؛ مما يعني أنه من المحتمل أن تكون هناك عوائق لا تستطيع هذه الروبوتات تخطيها، بسبب صغر حجمها، ربما فجوات بسبب انهيار جزء من الأرض، أو سقوط عوارض أو خزائن مكتبية، تسد مسار الروبوت ويتعذر على الروبوت تسلقها بسبب ارتفاعها الشديد.

ماذا لو كان الروبوت، عند مواجهة مثل هذه المشكلة، قادرًا على استدعاء روبوتات أخرى قريبة؟ وعندما يتجمع عدد كافٍ من الروبوتات، تتحد جسديًّا معًا لتشكيل روبوت أكبر قادر على تخطي الفجوة أو تسلق العقبة العالية. وعند الوصول إلى الجانب الآخر من العقبة، تتفكك الروبوتات وتتفرق وتواصل بحثها كروبوتات فردية.

بعد ذلك، يعثر روبوت على أحد الناجين، لكن السقف فوق الناجي هش وقد ينهار. فيستدعي الروبوت الروبوتات الأخرى مجددًا وتتجمع ذاتيًّا في هيكل مختلف ثلاثي الأبعاد، وتنشئ هذه المرة صدَفة — ما يشبه ملجأً روبوتيًّا قويًّا — فوق رأس الناجي والجزء العلوي من جسمه. تقوم الروبوتات بذلك وتوفر في الوقت ذاته الإسعافات الأولية للناجي، إضافةً إلى التواصل الصوتي والمرئي الضروري بين الناجي وعمال الإنقاذ خارج المبنى، وكذلك بيانات الموقع. وبهذا، يوفر سرب الروبوتات الدعم والمساعدة الماديين للناجي حتى يتمكن عمال الإنقاذ من إخراجه بأمان من المبنى.

قد يبدو هذا السيناريو كشيء من الخيال العلمي، لكنه ليس بعيد المنال. يوجد مشروع بالفعل يُسمى «سيمبراين» يطور تقنيات علم الروبوتات الأساسية اللازمة لتحقيق هذه الرؤية. ويجمع سيمبراين بين أفكار من أسراب الروبوتات المتباينة، والروبوتات التركيبية أو الذاتية التجمع، والروبوتات التطورية، والعناصر القوية للتصميم والإلهام الأحيائي.

يهدف مشروع سيمبراين إلى إنشاء سرب من الروبوتات المتباينة تتمتع بقدرات عالية على المستوى الفردي (من حيث الاستشعار والتواصل)، وتتنقل بشكل مستقل، وقادرة عند الضرورة على التجمع ذاتيًّا بشكل مستقل وتكوين «كائنات» ثلاثية الأبعاد. يعتمد الشكل والهيكل المحدَّدان الذي سيتخذه كائن السيمبراين على طبيعة المهمة الملقاة على عاتق روبوتات السيمبراين، وسيكون من المستحيل بالطبع التنبؤ بجميع الأشكال الممكنة التي يمكن الاحتياج إليها؛ لذا فالفكرة الأساسية أن السيمبراين سيكون قادرًا على التكيف

مع هياكل جسدية جديدة، أو التطور إليها فعليًّا في حقيقة الأمر. والأهم من ذلك أن عملية التجمع الذاتي يمكن عكسها؛ فعندما لا تكون هناك حاجة إلى الكائن، سيتفكك بشكل مستقل إلى الروبوتات الفردية المكونة له. وبهذا، فإن الروبوتات الفردية تتناوب بين وضع السرب، حيث تعمل بشكل أساسي في وضع ثنائي الأبعاد، ووضع الكائن.

أنشأ فريق مشروع سيمبراين، بقيادة بول ليفي وسيرج كيرنباخ، ثلاثة أنواع من الروبوتات الأساسية، المصمَّمة للتعاون (بشكل تكافلي). هذه الأنواع الثلاثة هي: روبوت «باكبون» وروبوت «أكتيف وييل» وروبوت «سكاوت». كلٌّ من هذه الروبوتات قادر على التنقل المستقل، وله أيضًا مفصل رزي يعمل بالطاقة. ويختلف كل روبوت في طريقة التنقل والتكوين الجسدي؛ ومن ثَم تتنوع القدرات ونقاط القوة.

تشترك الروبوتات الثلاثة في واجهة إرساء واحدة، مزوَّدة بمنافذ إرساء على عدة أوجه؛ مما يمكِّن كل روبوت من أن يلتحم فعليًّا مع روبوتين آخرين على الأقل. وتوفر واجهة الإرساء آلية قفل قوية ميكانيكيًّا تعمل بمحرك، إضافةً إلى وصلات كهربائية توفر ناقلًا للطاقة، إلى جانب اتصالات الشبكات السلكية بين الروبوتات الملتحمة.

من وجهة نظر بيولوجية، من المفيد والمناسب نوعًا ما أن نتخيل روبوتات السيمبراين الفردية بوصفها خلايا مفردة و«كائن» السيمبراين بوصفه كائنًا متعدد الخلايا. فنحن لدينا ثلاثة «أنواع» من الخلايا في كائن واحد، لكنها قادرة على التعاون بشكل تكافلي، ومشاركة موارد الطاقة على سبيل المثال، أو الاستفادة من القدرة الحركية المتزايدة بشكل كبير للكائن المتعدد الخلايا ككلٍّ.

إنَّ دور روبوت السيمبراين الفردي، أو الخلية، داخل الكائن يعتمد بدرجة كبيرة بالطبع على موقعه المادي داخل ذلك الكائن، ومن الواضح أن خلايا الكائن الروبوتية تحتاج إلى تنسيق أفعالها حتى يتمكن الكائن من السير أو التسلق أو سد الفجوات، على سبيل المثال. لذلك يتمتع الكائن بالفعل بالقدرة على القيام بعملية مشابهة لتمايز الخلايا: عندما يتجمع كائن السيمبراين ذاتيًّا، ستحتاج الخلايا الروبوتية الفردية إلى اعتماد وظيفة متخصصة وفقًا لموقعها؛ وعندما تتفكك ذاتيًّا، فإن الخلايا الروبوتية الفردية ستعود نوعًا ما لتصبح روبوتات غير متمايزة تشبه «الخلايا الجذعية».

قد تجد بعض الخلايا الروبوتية نفسها، على سبيل المثال، في هيئة عناصر هيكلية صلبة، لا يُطلب منها التحرك أو العمل خلال وجودها في الكائن، حيث تؤدي دور الخلايا العظمية. وقد تجد الخلايا الروبوتية الأخرى نفسها تعمل كخلايا «ركبة»، فتنحني، عند

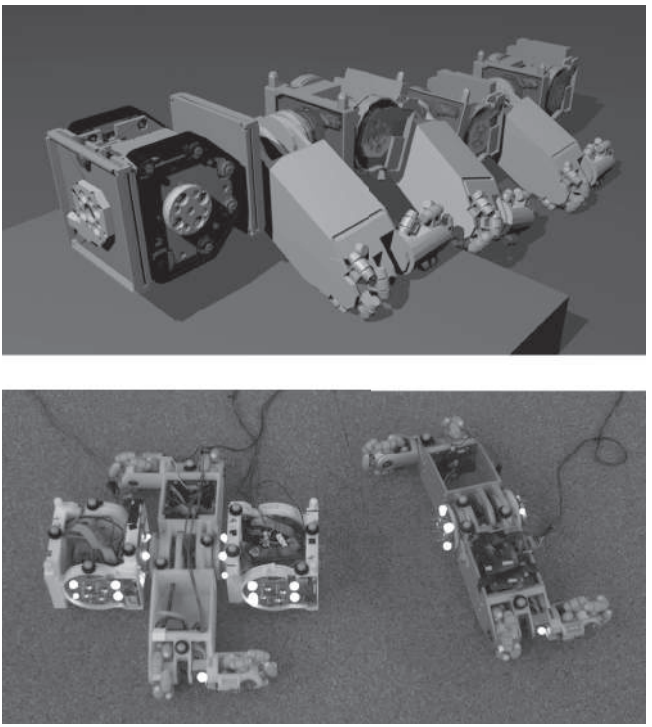
الحاجة، لتشكيل حركات رجل الكائن في أثناء السير. وتمتد التشبيهات الحيوية إلى أبعد من ذلك. فنظرًا لأن بعض الخلايا الروبوتية في الكائن الحي سيكون لها متطلبات طاقة أكبر من غيرها — على سبيل المثال، تتطلب خلايا الركبة طاقةً أكبر من الخلايا العظمية — فلن يوفر ناقل الطاقة في كائن السيمبراين مشاركة الطاقة فحسب، بل سيحافظ على استتبابها أيضًا، لتوفير التوازن المناسب للطاقة في جميع أجزاء الكائن.

علاوةً على ذلك، نحن بحاجة إلى قبول أن الخلايا الروبوتية الفردية ستواجه أعطالًا. حتى مع وجود روبوتات وكائنات مصمَّمة جيدًا باستخدام أعداد صغيرة من الخلايا الروبوتية (أي أقل من عشرين)، فإن التعقيد الكلي للكائن يعني أنَّ الأعطال ستكون حتمية. لذلك، ستحتاج كائنات السيمبراين إلى نظام مناعة اصطناعي قادر على اكتشاف أي عطل في الخلية الروبوتية الفردية والتعويض عنه بطريقة ما.

يُوضِّح الشكل ٥-٥ (الشكل العلوي) كائنًا ثلاثي الأبعاد داخل نظام محاكاة سيمبراين. يتكون هيكله الجسدي من سبعة روبوتات لتشكيل روبوت سداسي الأرجل يشبه الحشرات. يمثل «الرأس» على اليسار روبوت «سكاوت». والثلاثة أزواج من «الأرجل» هي روبوتات «أكتيف ويل»، يتصل كلٌّ منها بمفاصل لرفع الكائن بأكمله عن الأرض. وبين كل روبوت عجلات نشطة يوجد روبوت «باكبون»، و«الذيل» على اليمين هو أيضًا روبوت «باكبون»؛ ويبدو الأمر كما لو أن الكائن يحتوي على ثلاثة أجزاء، يتكون كلٌّ منها من روبوت «أكتيف ويل» وروبوت «باكبون». يظهر الروبوت السداسي الأرجل وهو يستخدم أرجله وعموده الفقري للتسلق إلى منطقة مرتفعة، وهو أمر لا يمكن لأي ربوت فردي أن يفعله بمفرده.

لتشكيل الكائنات الموضَّحة في الشكل ٥-٥، تلتحم روبوتات سيمبراين الفردية بعضها مع بعض لتتجمع ذاتيًّا في شكل ثنائي الأبعاد، كأشكال جسم مستوية، كما هو موضَّح في الشكل ٥-٥ (الشكل السفلي). بعد ذلك، ينسق الكائن المسطح عمل المحركات المختلفة في مفاصل الخلايا الروبوتية المكونة له لرفع نفسه عن الأرض ويصبح كائنًا ثلاثي الأبعاد.

لقد صُمم هيكل جسد كائن السيمبراين الموضَّح في الشكل ٥-٥ يدويًّا. ومع ذلك، فإن من أهداف المشروع تطوير الهياكل الجسدية وتضمين عملية التطور الاصطناعي داخل الروبوتات ذاتها، وهي تقنية تُعرَف باسم التطور المستمر. ويعد هذا النهج بأن يكون الروبوت ككلٍّ قادرًا، في أثناء التشغيل، على تطوير الهياكل الجسدية، على النحو الأمثل لتلبية الاحتياجات الخاصة للمهام التي يتعين عليه إنجازها.



شكل ٥-٥: كائن سيمبراين. الشكل العلوي: تصور لكائن ثلاثي الأبعاد. الشكل السفلي روبوتات سيمبراين من نوع «باكبون» و«أكتيف ويل» في عملية التجمع الذاتي المستقل

المربع ٣: أنظمة محاكاة الروبوتات

في أبحاث علم الروبوتات، أصبح نظام المحاكاة أداة أساسية في عمل علماء الروبوتات. والسبب في ذلك أن تصميم الإصدارات المتتالية من الروبوتات الحقيقية وصنعها واختبارها أمرٌ مكلف ويستغرق وقتًا طويلًا، وإذا كان من الممكن تنفيذ جزء من هذا العمل في العالم الافتراضي بدلًا من العالم الحقيقي، فيمكن تقليص أوقات التطوير، وربما تتحسن أيضًا فرص الحصول على روبوت يعمل من أول مرة بشكل كبير.

يتضمن نظام محاكاة الروبوت ثلاث خصائص أساسية. أولًا: يجب أن يوفر عالمًا افتراضيًّا. ثانيًا: يجب أن يوفر وسيلة لإنشاء نموذج افتراضي للروبوت الحقيقي. وثالثًا: يجب أن يسمح بتركيب

وحدة التحكم في الروبوت و«تشغيلها» على الروبوت الافتراضي في العالم الافتراضي، وبعد ذلك تحدد وحدة التحكم كيفية تصرف الروبوت عند تشغيله في نظام المحاكاة. ويجب أن يوفر نظام المحاكاة أيضًا تصورًا للعالم الافتراضي والروبوتات الافتراضية فيه حتى يتمكن المصمم من فهم ما يحدث.

يجب أن يكون أول هذه المتطلبات، وهو العالم الافتراضي، قابلًا للتخصيص. ويجب أن يسمح للروبوت المُطوَّر أن يكون قادرًا على إنشاء نسخة مطابقة من بيئة التشغيل الحقيقية للروبوت، وتزويدها بالأجسام التي يتعين على الروبوت استشعارها أو التفاعل معها أو التحكم فيها ماديًّا. والأهم من ذلك أن العالم الافتراضي يحتاج إلى محاكاة فيزياء العالم الحقيقي، بدرجة مقبولة من الدقة، بحيث عندما تتصادم الأجسام الصلبة مثلًا، لا تمرُّ ببساطة بعضها من خلال بعض، بل تتصرف كما يحدث في الواقع. ينبغي محاكاة الجاذبية وقوى الاحتكاك أيضًا، حتى تكون حركات الروبوت الافتراضي عند التسارع أو التباطؤ واقعيةً بالنسبة لنوع العجلات أو الأرجل التي يمتلكها الروبوت والسطح الذي يتحرك عليه.

لتلبية المطلب الثاني، يجب أن يوفر نظام المحاكاة مجموعة من نماذج أجهزة الاستشعار والمشغلات الحقيقية. وإذا كان لدى الروبوت، على سبيل المثال، مستشعرات اقتراب تعمل بالأشعة تحت الحمراء، فإن المستشعرات الافتراضية يجب أن تتمتع قدر الإمكان بنفس ما تتمتع به نظيراتها الحقيقية من نطاق وحساسية. وبالمثل، يجب أن توفر المحركات الافتراضية في العالم الافتراضي القدر ذاته من الحركة الذي توفره المحركات الحقيقية في العالم الحقيقي عند إعطائها الأوامر ذاتها. ويجب أن تكون الكاميرا الافتراضية في الروبوت الافتراضي قادرة على التقاط الصورة ذاتها التي ستراها الكاميرا الحقيقية عند تثبيتها على الروبوت الحقيقي في الموضع ذاته، وتشير إلى الاتجاه ذاته في العالم الحقيقي. وعلى نحو مماثل، يتعين على المستشعرات الأخرى، مثل مستشعرات اللمس والاقتراب وتحديد المدى بالليزر، إنتاج بيانات الاستشعار ذاتها التي ستنتجها المستشعرات الحقيقية لنفس العوائق الموجودة في نفس المواضع، وينبغي أن تكون مطابقة لما يحدث في العالم الحقيقي. وتُعتبر هذه المتطلبات تحديات صعبة لمطوِّري أنظمة محاكاة الروبوتات.

يُوضِّح الشكل ٥-٦ صورة شاشة لنظام المحاكاة «ويبوتس»، بينما يحاكي ستة من روبوتات «ناو» التي تشبه البشر وهي تلعب مباراة كرة قدم ثلاثية الفرق. لاحظ أن الصور الصغيرة تُظهر ما تراه عينا كل روبوت بملعب المباراة. ويوضح هذا أن أنظمة المحاكاة تحتوي عادةً على نماذج مدمجة لمجموعة من الروبوتات المتوفرة؛ ومن ثَم لا يكون هناك حاجة إلى إنشاء نموذج افتراضي للروبوت الحقيقي. تُوضِّح الصورة أيضًا المنافسة المفتوحة «روبوستاديوم»، التي تُلعب وفقًا لقواعد دوري المنصة القياسية الخاصة بكأس الروبوتات «روبوكب»، حيث يمكن لفرق من مبرمجي الروبوتات تطوير خوارزميات كرة القدم الروبوتية واختبارها، والتنافس بعضهم مع بعض، كل ذلك داخل نظام المحاكاة.

شكل ٥-٦: محاكاة لروبوتات «ناو» التي تشبه البشر وهي تلعب مباراة كرة قدم ثلاثية الفرق في نظام المحاكاة «ويبوتس»

الفصل السادس

مستقبل علم الروبوتات

يتمثل تحدي تأليف كتاب مثل هذا في أن موضوعه، أي علم الروبوتات، لا يزال في طور النشوء. في الواقع، تتسارع وتيرة تقدم علم الروبوتات؛ لذلك من المحتمل أن تكون هناك تطورات مهمة في المستقبل القريب، بما في ذلك بعض المفاجآت الكبيرة. أعني بذلك إما وجهات نظر تم التغاضي عنها في أبحاث الروبوتات في الوقت الحاضر وتبين أنها مهمة، وإما تقنيات الروبوتات التي لم تُخترع بعد وسيكون لها تأثير كبير.

من المستحيل توقُّع هذه الاكتشافات؛ لذا بدلًا من ذلك، سيتناول هذا الفصل مسألة مستقبل علم الروبوتات من خلال تحديد ومناقشة المشكلات الفنية التي قد تحتاج إلى حل من أجل تصميم عدد من الأنظمة الروبوتية التي تعتمد على «التجارب الفكرية»؛ أولًا: عالم كواكب روبوتي مستقل؛ وثانيًا: سرب من الروبوتات الطبية الدقيقة؛ وثالثًا: روبوت رفيق يشبه البشر ويتمتع بذكاء بشري.

(١) عالم كواكب روبوتي مستقل

للروبوتات تاريخ طويل ومميز في استكشاف الفضاء. فمنذ إطلاق سبوتنيك ١ في المدار الأرضي في عام ١٩٥٧، سيطرت المركبات الفضائية الآلية على مجال استكشاف الفضاء. واقتصرت مهمة استكشاف الفضاء السحيق على المركبات الآلية؛ فكر في المركبتين الفضائيتين فوياجر ١ و٢ اللتين أُطلقتا في عام ١٩٧٧، ولا تزالان توفران بشكل ملحوظ بياناتٍ علميةً من حافة النظام الشمسي. قد يبدو من الغريب ذِكرُ هذه المركبات في كتاب عن علم الروبوتات، لكنني أزعم أنها في جوهرها روبوتات مُشغَّلة عن بعد. فهي منصات غنية بالمستشعرات ومزوَّدة بمشغلات، ودرجة عالية من التحكم البشري عن بعد لإجراء تصحيحات في المسار أو لضبط المعدات العلمية وتشغيلها.

من الروبوتات الأقل غموضًا مركبات الكواكب الجوالة التي قدمت خدمة استثنائية في استكشاف سطح كوكب المريخ، حيث تجاوزت المركبتان الجوالتان سبيريت وأوبورتيونيتي لاستكشاف المريخ العمر المحدد لمهمتهما وأهدافهما العلمية. ما من شك في أن الروبوتات ستستمر في قيادة مهمات استكشاف أسطح الأجسام الكوكبية، بما في ذلك الكواكب والأقمار والكويكبات والمذنبات، وربما تمهد الطريق لمهمات يقودها البشر. ولكن، كما اقترحت مقدمتي المختصرة في الفصل الثاني، تمثل مركبات الكواكب الجوالة الحالية الحد الأقصى للتشغيل العملي للروبوتات عن بعد. ويحد بشكل كبير التقييدَ المادي الذي لا مفر منه لتأخيرات الاتصال من سرعة انتقال المركبة الجوالة؛ مما يحصر المنطقة التي يمكن استكشافها؛ ومن ثَم المردود العلمي من المهمة في نهاية المطاف. ونظرًا للتكلفة العالية جدًّا لاستكشاف الكواكب (حتى بالمركبات الآلية)، فمن الواضح أنَّ تحقيق المزيد من الاكتشافات العلمية مقابل مستوًى معين من الإنفاق يُعَد محركًا مهمًّا، وإحدى طرق تحقيق ذلك هي زيادة مستوى الاستقلالية؛ بعبارة أخرى، تصميم عالم كواكب مستقل.

لنبدأ بالتفكير في عالم الكواكب الروبوتي المثالي. في الوضع النموذجي، سيكون مستقلًّا بشكل كافٍ بحيث إنه بمجرد توصيله بأمان إلى سطح الكوكب، سينفذ مهمته في الاستكشاف والمسح، ويتعهد بمجالَي علم الأرض وعلم الحياة الخارجية، ولا يتصل بالقاعدة الرئيسية إلا لإرسال تقارير الحالة والصور والبيانات العلمية. وسيكون الروبوت قادرًا على أن يقرر بنفسه كيفية استكشاف بيئته والمعالم التي تستحق الفحص الدقيق. وسيتمكن من تخطيط وتنفيذ أي حركات جسدية لازمة لتقريب نفسه من تلك المعالم، ثم تحديد أفضل طريقة لاستخدام معداته العلمية لاكتشاف أكبر قدر ممكن عنها. باختصار، عليه أن يتصرف وكأنه عالم بشري متخصص في علم الأرض وعلم الأحياء الخارجية في الوقت ذاته، ويلاحظ ويفحص أي شيء قد يجده نظراؤه من البشر مثيرًا للاهتمام.

ولكن، كأي مستكشف بشري وحيد بعيد عن وطنه، سيحتاج الروبوت إلى تَوخِّي الحذر. فقد يحتاج إلى إحساس مصطنع بالحفاظ على الذات حتى يتمكن من تحديد متى يجب ألا يتحقق من كثَبٍ من جسد معيَّن؛ لأن هناك احتمالية كبيرة جدًّا للتعرض للخطر (فكر في تشكيل صخري طويل يمكن أن ينهار على المركبة الجوالة إذا اقتربت منه، أو جسد في مكان خطير أو يتعذر الوصول إليه، أو ببساطة شيء غير متوقع على الإطلاق).

وكذلك يجب أن يكون المستكشف الروبوتي المثالي متكيفًا وفطنًا، مثل المستكشف البشري. ففي حالة تغير الظروف البيئية، على سبيل المثال، يجب أن يتمتع بالقدرة على

تكييف نشاطه للتأقلم، ربما بـ «الدخول في وضع السكون» للحفاظ على الطاقة. ويجب أن تكون المركبة الجوالة قادرة أيضًا على الإصلاح الذاتي، حتى إذا تعرضت أجزاء من الروبوت للتلف، أو تعطلت بسبب البلى والثقب، يمكن للروبوت استبدالها بقطع بديلة. أو في حالة عدم وجود قطع بديلة، يكيف عمله لتعويض النقص.

بطبيعة الحال، تتمتع البيانات العلمية التي تجمعها المركبة الجوالة بقيمة كبيرة، وتُعتبر سبب وجودها؛ لذلك إذا فقد الروبوت كل الاتصالات وتعرَّض لعطل كارثي، فينبغي أن يكون قادرًا على إطلاق كبسولة بيانات، ربما باستخدام منارة لا سلكية؛ حتى تتمكن أي مركبة جوالة من العثور عليها في المستقبل، مثل المستكشف الذي تنتهي حياته ولكنه يترك مذكراته ودفاتر ملاحظاته ليعثر عليها من يأتون بعده.

(١-١) كيف ستبدو المركبة الجوالة وكيف ستتحرك؟

إن عالم الكواكب الروبوتي الذي يتمتع بهذا المستوى من القدرة والاستقلالية بعيدٌ كل البعد عن التقنيات الحالية، ولكن هل من الممكن صنع مثل هذا الروبوت، وماذا ستكون التحديات الرئيسية؟ فكر أولًا في شكل جسم الروبوت ووسائل تنقله. يعتمد كثير، بالطبع، على مقدار ما يُعرف عن طبيعة سطح الكوكب، وتركيبه الكيميائي، ودرجات حرارته، وقيم ضغطه. وإذا كان الغلاف الجوي يُخفي سطح الكوكب، فيجب تخمين ظروف السطح، ومع الهندسة الجيدة وكثير من الحظ، ستبقى المركبة لفترة طويلة كافية لإرسال البيانات المفيدة.

أُطلقَ مسبار هويجنز في عام ٢٠٠٤ من المركبة الفضائية كاسيني إلى سطح تيتان، قمر كوكب زحل، وكان من المستهدَف أن يهبط على ساحل مجهول التكوين؛ ولذلك صُمم المسبار للهبوط إما على سطح صلب وإما على محيط هيدروكربوني. لكن دعونا نفترض أن أرضية كوكبنا المستهدَف قيد الاستكشاف صلبة. أثناء تطوير مركبات المريخ الجوالة، بُذلت كثير من الجهود لتصميم أنظمة التنقل، وعلى نطاق واسع يُعتبر التصميم المزوَّد بستِّ عجلات تعمل بالطاقة على مركبات متأرجحة مثاليًّا لاجتياز التضاريس الصخرية الوعرة. وكما هو مُوضَّح في الشكل ٢-٣، يتيح نظام تعليق المركبات المتأرجحة للمركبة الجوالة القيادةَ بأمان فوق العوائق أو عبر الثقوب التي يزيد حجمها عن قطر العجلة (٢٥٠مم).

وقد صُممت مركبات المريخ الجوالة لاجتياز المناطق الصحراوية التي تحتوي على قليل من الصخور الكبيرة (مقارنةً بحجم المركبة الجوالة)، ولكن ماذا لو كانت خشونة

سطح الكوكب غير معروفة؟ إذا كانت طبيعة سطح الكوكب غير معروفة تمامًا، ولكن يحتوي الكوكب على غلاف جوي، فسيكون أحد الخيارات هو الطيران فوق السطح، وربما الإقلاع والتنقل والهبوط بين المواقع المهمة. وللمركبات الطائرة المخصصة لاستكشاف الكواكب مشاكلها الخاصة، ولكن مع وجود غلاف جوي كثيف بدرجة كافية، لا شك في أن المركبات الأخف وزنًا من هواء الكوكب تقدم خيارًا جذابًا.

لنفترض أنه إما أن الكوكب ليس له غلاف جوي وإما أنه رقيق جدًّا بحيث لا يتحمل أي نوع من المركبات الطائرة. إذَن ما البدائل لدينا؟ أحد الخيارات، خاصةً إذا كانت الجاذبية منخفضة، ربما على كوكب أو كُوَيكِب، هو روبوت قادر على القفز. لكن هذا أيضًا لا يخلو من المشكلات؛ لأنك إذا قفزت فأنت لا تعرف بالضبط أين ستهبط، وسيكون من الصعب للغاية ضمان عدم الهبوط في أحد الصدوع. ولذلك يصبح الخيار الأكثر أمانًا هو الروبوت الذي يتدحرج أو يسير بحذر وفقًا لسيطرته الذاتية.

إن النهج الأساسي للتصميم المادي للروبوت العالم سيكون هيكلًا يشبه كائن السيمبراين، حيث يتكون الروبوت من عدد من وحدات شبه مستقلة تتجمع ذاتيًّا بحيث يمكن للروبوت أن يغير شكله بين التكوينات المختلفة، حسبما تتطلب احتياجات التضاريس، على سبيل المثال، شكل صغير الحجم بعجلات للتنقل السريع على أرض ناعمة، أو هيكل عنكبوتي بأرجل طويلة لاجتياز حقل صخري بحذر.

تتمثل إحدى المشكلات التي تواجه مُصمِّم أي مركبة كواكب جوالة في أنه، حتى مع وجود نظام استشعار أمامي ممتاز، لا يستطيع الروبوت معرفة ما إذا كانت الأرض التي يوشك أن يسير عليها مستقرة بدرجة كافية لتحمل وزنه. وسيعمل نهج سيمبراين مرةً أخرى على حل هذه المشكلة. فالوحدات الفردية يمكنها فصل نفسها، والمضي قدمًا لاستكشاف الأرض، وفحصها فعليًّا لتحديد ما إذا كانت آمنة، ثم العودة والتجمع مجددًا. وإذا فشلت وحدة الكشافة في العودة، فإن الخسارة ليست بالغة الأهمية بالنسبة للمهمة؛ لأن عالم الروبوت يتكون من مجموعة من مئات الوحدات.

(١-٢) كيف سيكون الروبوت عالمًا؟

دعونا ننتقل الآن إلى التحديات التي يطرحها الذكاء الاصطناعي للروبوت. فبصفته عالمًا متخصصًا في علم الأرض وعلم الأحياء الخارجية، ينبغي برمجته بقاعدة معرفية كبيرة في مجال علم الأرض وعلم الأحياء. ونظرًا لقدرة التخزين الكبيرة السعة، فإن إمكانية تخزين

كل ما هو معروف في هذين المجالين داخل الروبوت كقاعدة بيانات يمكن البحث فيها هي فكرة قابلة للتحقيق كليًّا.

بالطبع، لتكون عالم كواكب جيدًا، الأمر لا يتعلق فقط بامتلاك عدد كبير من الحقائق. بل يتعلق بالقدرة على طرح السؤال الصحيح. وهنا، سيستفيد الروبوت بلا شك من أحد الابتكارات في مجال الذكاء الاصطناعي من سبعينيات القرن الماضي، اسمه نظام الخبرة: وهو نهج لتسجيل العملية التي يستخدم فيها الخبير البشري تلك الخبرة. ويمكن للمرء أن يتخيل عالم الكواكب الروبوتي يمرُّ بمرحلة تدريب طويلة قبل الإطلاق، حيث يخضع لسلسلة من التجارب تحت إشراف خبير بشري؛ لذلك في كل مرة يتخذ فيها الروبوت قرارًا بشأن ما «يعتقد» أنه قد يكون معلمًا مثيرًا للاهتمام يستحق التحقيق بأمره، يقوم الخبير البشري إما بتصحيح الأخطاء وإما اقتراح البدائل؛ ومن ثَم «تدريب» الروبوت.

إذا كانت أنظمة الخبرة تسمح للروبوت بـ «تحديد» الأمور المثيرة للاهتمام، مما يمنحه «فضولًا علميًّا» اصطناعيًّا، فإنه يحتاج أيضًا إلى نظام لإضفاء الحذر على هذا الفضول، وهنا تأتي «غريزة الحفاظ على الذات» الاصطناعية لدى الروبوت. وأعتقد أن الروبوت سيحتاج إلى نظام لتقييم مخاطر كل فعل ذاتيًّا.

من الإمكانيات المتاحة أن يكون للروبوت، مثل كرونوس، نموذج لنفسه بداخله، حيث يكون قادرًا على إعداد نماذج المحاكاة وتشغيلها لكل خيار متاح له. وهذا يعادل قدرة الروبوت على «دراسة» مسارات العمل الممكنة وتحديد مخاطر كلٍّ منها.

يُبرمَج نظام المحاكاة الداخلي للروبوت مسبقًا بكل بيانات رسم الخرائط أو عمليات المسح التي توفرها الأقمار الصناعية المدارية. وبعد ذلك، أثناء عملية الاستكشاف، يملأ الروبوت التفاصيل الخاصة بتلك الأجزاء من الأراضي التي زارها، أو يمكنه فحصها أو استشعارها مباشرة؛ ومن ثَم يتحسن نموذجه الداخلي.

ويمكن جعل الروبوت قادرًا على التوصل إلى حلول جديدة للمواقف التي يجد نفسه فيها عن طريق إجراء خوارزمية جينية، كما هو موضَّح في الفصل الخامس، لتطوير سلوكيات جديدة. أو يطور شكل جسده، إذا كان روبوتًا من نوع سيمبراين، عن طريق اختبار عدد كبير من المتغيرات الخاصة به في نظام المحاكاة.

يمكن توسيع نطاق النهج ذاته لمنح الروبوت خصائص الإصلاح الذاتي. فالروبوت يمتلك نموذجًا خاصًّا به داخل نظام المحاكاة؛ لذا فهو قادر على البحث عن طرق للتغلب

على الأعطال. وفي حالة عدم عمل عجلة معينة، على سبيل المثال، يمكن للخوارزمية الجينية البحث عن سلوك تحكم أو في واقع الأمر تصميم جديد للتعويض عن العطل.

بدراسة تقنيات الذكاء الاصطناعي هذه كلٍّ على حدة، لا يُعتبر أيٌّ منها متطرفًا أو غريبًا، ولكن ما قد يمثل تحديًا كبيرًا هو تجميعها معًا وجعلها تعمل. وتجدر الإشارة أيضًا إلى أن الحلول الموضَّحة هنا لتصميم عالم كواكب مستقل ستطبق بالمثل على الروبوتات الموجودة على كوكب الأرض، ليس فقط لإجراء عمليات الاستكشاف أو الفحص أو المراقبة البيئية المستقلة، ولكن أيضًا لتُستخدم في التطبيقات الأكثر واقعيةً مثل استخلاص المواد من مكب النفايات.

(٢) سرب من الروبوتات الطبية الدقيقة

قد تبدو تجربتنا الفكرية الثانية خيالًا علميًّا خالصًا، وهي: سرب من الروبوتات المجهرية القادرة على العمل داخل جسم الإنسان وتنفيذ إجراءات طبية مباشرة. وقد تكون الرؤية الطويلة المدى سربًا يمكن حقنه في الأوعية الدموية. حينها سيسبح حرفيًّا سرب الروبوتات الدقيقة إلى مصدر المشكلة، إما بتوجيه من الجراح وإما دون تحكم بشري خارجي على الإطلاق. وبمجرد تحديد موقع المشكلة، ستتمكن الروبوتات الدقيقة بشكل مثالي من الإشارة إلى موقعها بالضبط وتوصيل العلاج أو إجراء جراحة مجهرية مباشرة.

يمكن لمثل هذه التقنية أن تحدث ثورة في الطب، وعلى نطاق أوسع، في مجالَي علم الأحياء والكيمياء الحيوية. فالقدرة على التحكم من خلال الروبوتات على مستوى الخلايا الفردية أو حتى الجزيئات سيفتح المجال أمام إمكانيات رائعة لعلم جديد. لكن هل هذه الرؤية خيالية، أم إنها شيء يمكن تطويره واقعيًّا في المستقبل المتوسط المدى (أي بعد عدة عقود)؟ وإذا كان ذلك ممكنًا فما المشكلات التقنية التي يجب حلها؟

يتمثل بالطبع التحدي الأكبر في تصغير الحجم. ولفهم مدى صعوبة هذه المشكلة، على الروبوت الدقيق القادر على الوصول إلى أصغر الشُّعيرات الدموية في الأوعية الدموية ألا يزيد حجمه عن ٢ ميكرومتر؛ أي جزأين من المليون من المتر. على النقيض، يزيد حجم أصغر روبوتات تقليدية يمكننا تصنيعها عن هذا الحجم بما يتراوح بين ألف و١٠ آلاف ضعف. لكن هناك تقدمًا ملحوظًا قد أُحرز نحو هدف تقليص حجم الروبوتات. واسمحوا لي أن أوضح بإيجازٍ هذا التقدم.

(٢-١) الروبوتات السنتيمترية

تنقسم الروبوتات المصغَّرة إلى ثلاث فئات عامة. تتضمن الفئة الكبرى روبوتات يبلغ حجمها بضعة سنتيمترات مكعبة. دعونا نُسمي هذه الروبوتات باسم الروبوتات السنتيمترية. وهي الآن شائعة نسبيًّا في مختبرات الأبحاث. أحد الأمثلة على ذلك هو الروبوت أليس؛ فحجم الروبوت أليس الأساسي دون المكونات الإضافية الموضَّحة في الشكل ٥-٤ أكبر قليلًا من مكعب السكر. ومثال آخر هو الروبوت «كيلوبوت» المنخفض التكلفة، المصمَّم في جامعة هارفارد لتجارب أسراب الروبوتات باستخدام حوالَي آلاف الروبوتات. ويبدو جسم الروبوت كيلوبوت على شكل قرص، قُطره نحوُ ٣سم وسُمكه ١سم، وهو مزوَّد بثلاث أرجل من الأسلاك الصلبة؛ ويؤدي اهتزاز الساقين إلى تحرك الروبوت.

إنَّ أليس وكيلوبوت مثالان للروبوتات المستقلة التي تتكون من عناصر مصغَّرة تقليدية (مثل: المحركات، والأجهزة الإلكترونية، والمستشعرات، والبطاريات). وهذه الروبوتات السنتيمترية، بالطبع، كبيرة جدًّا بالنسبة للتطبيقات الطبية داخل أجسام الكائنات الحية في تجربتنا الفكرية.

(٢-٢) الروبوتات المليمترية

يتطلب تقليل الحجم التالي تقنيات تصميم وتصنيع مطوَّرة من تصميم الشرائح. تُسمى هذه التقنية بالأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة، وتُسمى الروبوتات التي تعتمد على هذه التقنية باسم الروبوتات الدقيقة المعتمدة على الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة. وتستخدم الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة أساسًا تقنية الطباعة الحجرية الضوئية ذاتها المستخدَمة في صنع الدوائر المدمَجة (الشرائح الدقيقة) على نفس الشريحة، لكن المكونات الميكانيكية (أي المتحركة) تُصنع مع المكونات الإلكترونية. وعلى الرغم من أن المكونات الفردية في الروبوتات الدقيقة المعتمدة على الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة تُقاس بالميكرومتر (أي أجزاء من المليون من المتر)، فإن حجم الروبوت بأكمله يصل إلى عدة مليمترات. ولذلك يمكننا تسمية هذه الروبوتات بالروبوتات المليمترية.

من الصعب للغاية تصميم روبوت مليمتري كامل للعمل يعتمد على تقنية الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة. ففي وقت كتابة هذا الكتاب، لم ينجح أحدفي تصميم وعرض

سرب واسع النطاق من الروبوتات المليمترية، لكن مشروعًا أوروبيًّا حديثًا يُسمى آي-سوارم قطع شوطًا كبيرًا نحو تحقيق هذا الهدف. يبلغ حجم نماذج الروبوتات الأولية لمشروع آي-سوارم ٣٫٩مم × ٣٫٩مم × ٣٫٣مم. ومع الوقوف على ثلاث أرجل، اثنتان في المقدمة وواحدة في الخلف، بالإضافة إلى «هوائي» للاستشعار باللمس يمتد من المقدمة، يمكن بسهولةٍ الخلط بين الروبوتات وبين الحشرات الصغيرة.

تدمج روبوتات آي-سوارم جميع الأنظمة الفرعية الأساسية لأسراب الروبوتات على سطح مسطح ثنائي الأبعاد. وتُولد الطاقة من خلال خلية شمسية صغيرة أعلى الروبوت؛ مما يعني أن الساحة التجريبية بحاجة إلى إضاءة ساطعة. وتتواصل الروبوتات معًا باستخدام وحدة بصرية دقيقة بارعة. وقد دُمج مستشعر اللمس وإمكانية التنقل في جهاز واحد يعتمد على الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة، ويعمل أيضًا كهيكل للروبوت. وتميل ثلاثة من الأرجل إلى الأسفل لرفع الروبوت عن السطح؛ وتُشير الرابعة إلى الأمام مباشرة، وتعمل كهوائي للروبوت. تُشغل الأرجل والهوائي باستخدام بوليمر نشط كهربائيًّا؛ مما يؤدي إلى اهتزازها. ومن خلال التحكم في الرجل (أو الأرجل) التي تهتز، يمكن دفع الروبوت إلى الأمام أو الخلف، أو تدويره. ويعمل هوائي الروبوت من خلال استشعار التغير في تردد الاهتزاز عندما يلمس الهوائي شيئًا ما.

يتحكم في روبوتات آي-سوارم كمبيوتر صغير تقليدي ٨بت مدمج مع الأجهزة الإلكترونية للتفاعل مع الخلية الشمسية ووحدة التواصل والأرجل والهوائي، كل ذلك في دائرة متكاملة محدَّدة التطبيقات ومخصَّصة لاستخدام معيَّن. ومن الميزات المبتكَرة الأخرى طريقة برمجة الروبوتات. فكود التحكم يُنزَّل إلى الروبوتات عن طريق تعديل إضاءة الحلبة.

إن حجم الروبوتات المليمترية، مثل روبوتات آي-سوارم، أكبر من أن تدخل في الأوعية الدموية (على الرغم من أن الروبوتات بهذا الحجم قد تكون مناسبة لجراحات القلب الروبوتية). وبالطبع، سيحتاج أي تطبيق داخل جسم الكائنات الحية إلى حل العديد من المشكلات، مثل: كيفية التنقل، ومصدر الطاقة، والتغليف. تُستخدم بالفعل كاميرات لا سلكية بحجم حبة الدواء، يمكن ابتلاعها، للمساعدة في تشخيص مشكلات القناة الهضمية. ومن المرجَّح أن يشيع في المستقبل القريب استخدام الروبوتات بحجم حبة الدواء التي تُشغل عن بعد في حالات التدخلات الطبية في الأمعاء.

(٢-٣) الروبوتات الميكرومترية

تتطلب الخطوة الكبيرة التالية في مجال التصغير للوصول إلى روبوتات دقيقة حقًّا — أي روبوتات يبلغ حجمها بضعة ميكرومترات — حل المشكلات الصعبة للغاية، وعلى الأرجح، استخدام أساليب مختلفة في التصميم والتصنيع. ومن أجل الإحساس بمدى صعوبة هذه الخطوة، ضع في اعتبارك أن الروبوتات الميكرومترية تحتاج إلى أن تكون أصغر ألف مرة من الروبوتات المليمترية. ومع ذلك من اللافت للنظر أن العمل جارٍ بالفعل للتصدي لهذه التحديات.

من المستحيل تقليص حجم المكونات الميكانيكية والكهربائية، أو أجهزة الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة، من أجل تقليل الحجم الإجمالي للروبوت إلى بضعة ميكرومترات. وعلى أي حال، فإن فيزياء التنقل عبر السائل تتغير على المستوى الميكرومتري ومجرد تقليص حجم المكونات الميكانيكية من كبير إلى دقيق — حتى لو كان ذلك ممكنًا — سيفشل في حل هذه المشكلة. يهدف النهج الحديث إلى ترك المواد والمكونات التقليدية والانتقال إلى نهج يعتمد على الهندسة الحيوية، حيث يتم تعديل البكتيريا الطبيعية عن طريق إضافة مكونات اصطناعية. والنتيجة هي مزيج من المكونات الاصطناعية والطبيعية (الحيوية).

تحتوي البكتيريا على العديد من الخصائص المرغوب فيها بالنسبة للروبوت الميكرومتري. وباختيار بكتيريا ذات سوط، يصبح لدينا إمكانية تنقل مناسبة تمامًا للوسط. والسوط هو «ذيل» صغير يُدار عن طريق «محرك» جزيئي رائع مدمج في جدار خلية البكتيريا. وتتحرك البكتيريا وتُوجَّه من خلال تشغيل هذا المحرك الجزيئي وإيقاف تشغيله. وهناك خاصية أخرى مرغوب فيها بشكل كبير، وهي أن البكتيريا قادرة على البحث عن الطاقة بشكل طبيعي؛ ومن ثَم تتجنب المشكلة الخطيرة المتمثلة في إمداد الروبوتات الميكرومترية بالطاقة.

من خلال هندسة البكتيريا بمواد مغناطيسية إضافية، تمكَّن عالما الروبوتات سيلفان مارتل ومحمود محمدي من «توجيه» بكتيريا واحدة، باستخدام مغناطيسات كهربائية خارجية يتحكمان بها من خلال كمبيوتر، واستخدماها لدفع خرزة يبلغ حجمها ٣ ميكرومترات في الوسط السائل التجريبي. من الناحية العملية، سيكون الروبوت الميكرومتري الهجين الفردي عديم الفائدة. ولذلك، نحتاج إلى سرب، وفي تجربة مذهلة أخرى، تمكَّن مارتل ومحمدي من تصميم سرب مكوَّن من حوالَي ٥٠٠٠ بكتيريا ذات

سوط موجَّهة مغناطيسيًّا، مرةً أخرى باستخدام الحقول المغناطيسية الخارجية. وفي عرض للتجميع والتحكم على المستوى النانوي، وُجه السرب لتحريك «المكعبات»، التي كان يبلغ طول كلٍّ منها ٨٠ ميكرومترًا، وتكوين هرم صغير.

ولكن، على الرغم من روعة هذه التجارب، فهي توضح نهجًا واحدًا فقط. ومن المحتمل ألا تمثل البكتيريا الهجينة أفضل طريقة لهندسة الروبوتات الدقيقة. وفي النهاية قد تكون الأساليب الأخرى التي تتمتع بنفس القدر من الغرابة أكثر فائدة: على سبيل المثال، الروبوتات الميكرومترية التي تُجمَّع باستخدام آلات نانوية جزيئية أصغر حجمًا، وهي فكرة اقترحها ريتشارد فاينمان وطوَّرها إريك دريكسلر في كتابه «محركات الخلق».

مهما كانت التقنية المستخدَمة لتصميم الروبوتات الميكرومترية، فلا بد من التغلب على مشكلات كبيرة قبل أن يصبح سرب الروبوتات الميكرومترية الطبية واقعًا ملموسًا. المشكلة الأولى تقنية، وتتمثل في كيفية تحكم الجراحين أو الفنيين الطبيين في السرب ومراقبته بشكل موثوق أثناء عمله داخل الجسم. أو، بافتراض أن بإمكاننا منح الروبوتات الميكرومترية ما يكفي من الذكاء والاستقلالية (وهو أيضًا تحدٍّ صعب للغاية)، فهل سنتخلى عن التحكم الدقيق والتدخل البشري تمامًا من خلال منح الروبوتات ذكاء الأسراب لتتمكن من القيام بالمهمة؛ أي العثور على المشكلة، وإصلاحها، ثم الخروج؟ في هذه الحالة، يمكن ببساطةٍ حقن سرب الروبوتات الميكرومترية في مجرى الدم وتركه للقيام بعمله، تمامًا مثل أي دواء: وبالفعل، سيكون عقارًا ذكيًّا يُجري العمليات الجراحية.

لكن هذه الأسئلة تقودنا إلى ما قد يُمثِّل بلا شكٍّ التحدي الأكبر، وهو: إثبات أن سرب الروبوتات الميكرومترية الطبية فعَّال ويمكن الاعتماد عليه، وقبل كل شيء آمن، ثم الموافقة على استخدامه والحصول على القبول العام. وهذا تحدٍّ يسلط الضوء على سؤال مثير للاهتمام لعلماء الروبوتات مثلي الذين يعملون في مجال سلامة الروبوتات. والسؤال هو: هل نتعامل مع التحقق من مدى صلاحية استخدام سرب الروبوتات الميكرومترية الطبية كمشكلة هندسية، ونحاول تطبيق الطرق ذاتها التي قد نستخدمها للتحقق من أنظمة السلامة الحرجة مثل أنظمة مراقبة الحركة الجوية؟ أم إننا بدلًا من ذلك نعتبر سرب الروبوتات الميكرومترية الطبية كدواء، ونتحقق من مدى صلاحية استخدامه من خلال العمليات التقليدية والموثوقة (عمومًا)، التي تتضمن التجارب السريرية؛ مما يؤدي إلى الموافقة وترخيص الاستخدام؟ أظن أننا سنحتاج إلى مزيج جديد من كلا النهجين.

(٣) روبوت رفيق يشبه البشر

بالنسبة لتجربتنا الفكرية الأخيرة، فكر في روبوت رفيق يشبه البشر. يُعتبر هذا المثال مهمًّا لأن الروبوتات التي تشبه البشر هي المكان الذي بدأت منه الروبوتات، ومن نواحٍ كثيرة، يُعتبر الروبوت الذي يتمتع بذكاء اصطناعي بشري المستوى حلمًا بالنسبة لعلم الروبوتات. ويرى العديد من علماء الروبوتات أن مثل هذا الروبوت أعظم محاكاة للحياة؛ ولذا يمكن القول إنه يُمثِّل هدف «المشروع الرئيسي» لعلم الروبوتات.

ماذا أعني بروبوت رفيق يشبه البشر؟ سيكون هذا الروبوت رفيقًا اصطناعيًّا. وسيكون قادرًا على التصرف إلى حدٍّ ما كخادم، وربما كمساعد شخصي. ولكن يجب أن يكون المساعد الشخصي الروبوتي قادرًا ليس فقط على خدمة سيدته البشرية ودعمها في المهام اليومية التي تتطلب مجهودًا، باعتباره خادمًا شخصيًّا، ولكن في الوقت ذاته كرفيق: أي مصدر للترفيه والراحة والمحادثة، مثل المساعد الشخصي الذي جسَّدته شخصية بي جي وودهاوس «جيفز»، أو «الروبوت أندرو» الذي لعبه روبن ويليامز في فيلم «رجل المائتَي عام» (بايسينتنيال مان). فهو كيان يمكن للمرء التفاعل أو التحدث معه أو حتى بناء علاقة صداقة معه.

يشير ويلكس، في كتابه «علاقات وطيدة مع الرفقاء الاصطناعيين»، إلى أن الخصائص المثالية للرفيق الاصطناعي المخصص للبالغين في منتصف العمر أو كبار السن (الذي يصفه بأنه رفيق كبير السن) قد تكون قريبة من مواصفات الرفيق المثالي في العصر الفيكتوري: «الأدب، والتعقل، ومعرفة مكانته، والاعتمادية، والسيطرة بقوة على العواطف، والتواضع، والفطنة، والبهجة، وحسن الاطلاع، والتسلية؛ وبالرغم من عدم أهمية الشكل، فلا بد من المظهر الجيد، وتكوين علاقات طويلة الأمد إن أمكن، والسماح بالتواصل الاجتماعي المحدود بين الرفقاء في غير أوقات العمل.» هذا يعني روبوتًا يتمتع بقدرات لغوية عالية لإجراء المحادثات، ولكنه ليس مفرطًا في المشاعر (المصطنعة). ويجب أن يكون حساسًا للغاية تجاه احتياجات سيدته ومشاعرها، ويُظهر درجة من التعاطف ولكن بدرجة مناسبة من الموضوعية، والأهم من ذلك أن يكون جديرًا بالثقة.

دعونا نضع جانبًا مسألةً ما إذا كان الروبوت الرفيق هذا مرغوبًا فيه (بالمعنى الأخلاقي الواسع لما إذا كانت هذه الروبوتات ستكون شيئًا جيدًا للمجتمع) ونقتصر على مسألة ما إذا كان ذلك ممكنًا تقنيًّا. وبافتراض أنه ممكن، فكم يبعد هذا الروبوت عن التنفيذ الفعلي؟ وما المشكلات التقنية التي يجب حلها من أجل الانتقال مما وصلنا إليه حاليًّا فيما يتعلق بتقنية الروبوتات إلى حيثما يجب أن نكون لتصميم مثل هذا الروبوت؟

أولًا: فكِّر في الشكل الذي يجب أن يبدو عليه الروبوت. نحن نفترض كفكرة مبدئية أنه يجب أن يكون بشريًّا، ولكن — كما أوضحت في الفصل الرابع — مصطلح «يشبه البشر» يشمل مجموعة واسعة جدًّا من الخصائص الجسدية. إذَن، هل يجب أن تتميز أجزاء من الروبوت فقط، ربما الرأس والذراعان، بمظهر عالي الدقة؟ أم يجب أن يبدو الروبوت بشريًّا بالكامل بحيث يشبه شخصًا ما على نحو تقريبي، مثل روبوتات الأكتروايد أو الجيمينويد الخاصة بهيروشي إيشيجورو (وهي نسخ طبق الأصل من أناس حقيقيين)؟

هذه ليست مجرد مسائل تتعلق بالمنتجات التجميلية ولكنها اعتبارات مهمة. فالروبوت يحتاج إلى مظهر ليس مقلقًا ولا سخيفًا؛ نظرًا لدوره كخادم ورفيق: ربما شكل يجمع بين الروبوت البشري والروبوت الشبيه بالرسومات المتحركة.

من المرجَّح أن تكون ذراعا الروبوت، وخاصةً اليدين، أكثر ما يقترب من البشر — عند مناولة الطعام أو الشراب لسيدته، أو المساعدة في ارتداء الملابس أو الاغتسال — لذلك يجب إيلاء قدر كبير من العناية والاهتمام لمظهرهما ونعومتهما ومطاوعتهما.

بشكل عام، يجب أن يكون الروبوت صغير الحجم وخفيف الوزن بدرجة كافية بحيث لا يمكن أن يتسبب في أي ضرر حقيقي إذا اصطدم بإنسان أو حتى وقع عليه. هناك بعض الأدلة على أن الروبوت يجب أن يكون أصغر من سيدته البشرية حتى لا يبدو مخيفًا: ربما بحجم إنسان بالغ صغير الحجم، لنقُل حوالَي ١٫٥ متر وبكتلة جسم ٣٠كجم؛ أي ما يعادل وزن طفل يبلغ من العمر ١٠ سنوات تقريبًا. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن يكون الروبوت ناعمًا ومطواعًا، على الأقل مثل إنسان بحجم مماثل.

(٣-١) كيف سيشعر بك الروبوت رفيقك؟

فكِّر الآن في المستشعرات التي سيحتاج الروبوت الرفيق إلى التزود بها. فنظرًا لوظيفته كخادم ورفيق شخصي، يجب أن يكون الروبوت قادرًا على استشعار سيدته البشرية بقدر كبير من الفطنة. وعلى أقل تقدير، يجب أن يكون الروبوت، أولًا، قادرًا على استشعار مكان سيدته وكم تبعد عنه. ويجب أن يكون الروبوت قادرًا على سماعها وتحديد موقع مصدر صوتها، وإدارة رأسه إذا لزم الأمر لمواجهتها استجابةً لطلب الانتباه شفهيًّا. ثانيًا: يجب أن يكون الروبوت قادرًا على رؤية سيدته وتتبع وضعية جسدها، بما في ذلك، والأهم على الإطلاق، اتجاه رأسها وموضع ذراعَيها ويدَيها من أجل «قراءة» إيماءات جسدها. ثالثًا: يجب أن يكون الروبوت قادرًا على رؤية وجه سيدته بدرجة كافية من الدقة حتى

يتمكن من التعرف عليها وعلى تعبيرات وجهها؛ وبما أن البشر يستخدمون نظرات العين لتوجيه اهتمامهم، يجب أن يكون الروبوت قادرًا على تتبع نظرات العين.

يوجد بالفعل تقنية استشعار لتلبية هذه المتطلبات بدرجة من التطور. وفي الواقع، طُورت بالفعل تقنية تتبع الجسم والصوت لسوق ألعاب الفيديو التفاعلية على شكل الجهاز كينيكت من مايكروسوفت، وليس من المستغرَب أن علماء الروبوتات سارعوا إلى تجربة هذه التقنية المنخفضة التكلفة.

يجب أن يكون الروبوت الرفيق قادرًا أيضًا على الشعور بصحة سيدته العامة وسعادتها؛ لذا فإن التزود بأجهزة الاستشعار الإضافية لمراقبة الإشارات الحيوية الأساسية، مثل درجة الحرارة والتنفس، ستكون فكرة جيدة. وعلى الرغم من أنه ليس روبوتًا ممرضًا، يجب أن يكون الروبوت الرفيق المؤهل قادرًا بالتأكيد على الشعور بما إذا كانت سيدته تعاني من خَطبٍ خطير وطلب المساعدة.

على الرغم من أن حواس الروبوت الرفيق تحتاج إلى التركيز على سيدته البشرية، يحتاج الروبوت أيضًا، بالطبع، إلى أن يكون قادرًا على استشعار بيئته والأجسام الموجودة فيها بدقة كافية ليتمكن من التحرك بأمان في جميع الأنحاء. ولدعم وظائف الخادم الخاصة به، يجب أن يكون الروبوت قادرًا على استشعار الأشياء والتعرف عليها جيدًا بما يكفي ليكون قادرًا على الإمساك بها، بما في ذلك مناولتها لسيدته (مثل الطعام أو الشراب)، أو مشاركة سيدته في مسك الأشياء (مثل الملابس، على سبيل المثال، أثناء المساعدة في ارتدائها أو خلعها).

(٣-٢) كيف سيعرفك الروبوت رفيقك؟

دعونا ننتقل الآن إلى ما هو بلا شكٍّ التحدي التقني الرئيسي الذي نواجهه في تصميم الروبوت الرفيق، وهو: ذكاؤه الاصطناعي. في البداية، أشرت إلى أن الروبوت يتطلب مستوى ذكاء بشري، وبالطبع، للتمتع بقدرة حوارية تكافئ قدرة المساعد الشخصي/الرفيق البشري (من حيث الفطنة، والبهجة، وحسن الاطلاع، والتسلية)، يحتاج الروبوت بالفعل إلى مستوى ذكاء بشري أو محاكاة مقنعة. ولسوء الحظ، فإن وضع قائمة منطقية لـ «وحدات» البرامج على غرار الطريقة التي استخدمتها مع جهاز استشعار الروبوت هو ببساطة أمر غير ممكن. فنحن لا نفهم بنية الذكاء البشري جيدًا بما يكفي لنكون قادرين على تصميم محاكاة اصطناعية منطقية.

يمكننا تقسيم الذكاء الاصطناعي للروبوت إلى قسمين رئيسيين: أحدهما للتعرف على الأجسام والتحكم بها، والآخر لقدرته على التحاور مع البشر.

(٣-٣) مناولة الأجسام والتحكم بها

كما أوضحت في الفصل الثاني، يمكن برمجة الروبوتات بمهارة معينة: على سبيل المثال، صب السائل في كوب أو طي الملابس. ولكن ليس من المنطقي برمجة الروبوت بكل احتمالية ممكنة لمناولة الأجسام؛ فببساطة هناك الكثير. وسيكون من الأكثر منطقية أن يكون الروبوت قادرًا على التعلم، عن طريق التقليد، من العرض البشري للمهمة (راجع الفصل الثالث للحصول على شرح عام لتعلم الروبوتات). حينها يُدرَّب الروبوت على عدد كبير من المهام والمهارات الأساسية قبل أن يغادر المصنع.

لكن تطوره لن يتوقف عند هذا الحد. فعلى الروبوت أن يكون قادرًا على مواصلة تعلم مهارات جديدة خلال عمره التشغيلي. وهذه طريقة جديدة للتفكير بشأن الآلات: حيث تُصنَّع الروبوتات، ثم تمرُّ بمرحلة التطور (وهذا مجال فرعي جديد يُسمى علم الروبوتات التطورية) حيث تتعرف على أجسادها، ثم تمرُّ بمرحلة تدريب تتعلم فيها مهارات وقدرات، وبعد ذلك — بوصفها روبوتات عاملة — تستمر في التعلم والتطور طوال عمرها التشغيلي.

من المثير للاهتمام أن ندرك أن الروبوتات، بمجرد تدريبها، ستكون قادرة على نقل مهاراتها إلى روبوتات أخرى من نفس النموذج بطريقة لا يستطيع البشر القيام بها. ومن ثَم، فمن المحتمل أنه في حالة نموذج معين من الروبوتات الرفيقة، لن يحتاج سوى الروبوت الأول فقط إلى الخضوع لنظام التدريب الكامل. وببساطة تُحمَّل مسبقًا الروبوتات اللاحقة بالمهارات المكتسَبة من الروبوت الأول (المُعاير لمحركات وأجهزة استشعار وغيرها من المكونات التي تحتوي على اختلافات طفيفة). يثير هذا أيضًا الاحتمال المثير للاهتمام أنه إذا واجه الروبوت الرفيق أثناء الخدمة مهمة لا يمكنه إكمالها، فقد يكون قادرًا على البحث في قاعدة بيانات عبر الإنترنت وتنزيل الإمكانية الجديدة ببساطة.

يجب أن تتطور إمكانيات الروبوت الرفيق الحالية في التحكم في الأجسام تطورًا ملحوظًا. فمن المدهش أن تكون قدرته الحوارية أقرب بكثير إلى الواقع من مهاراته في التحكم في الأجسام.

(٣-٤) نحو ذكاء اصطناعي بشري المستوى: روبوتات الدردشة

دعونا نفكر فيما يمكننا بناؤه الآن، ونحاول تقييم مدى اقترابه من تحقيق هدف الذكاء الاصطناعي بشري المستوى. أولًا: هناك مدخلات ومخرجات المحادثة التي تتطلب التعرف على الكلام وتركيب الكلام، وكلاهما الآن تقنيتان متطورتان بشكل معقول. ونظرًا لقدرة برنامج التعرف على الكلام على تعلم أنماط الكلام وعادات المتحدث البشري ومجاراة الكلام الطبيعي، يمكن القول بأنه يشتمل على بعض وظائف الذكاء الاصطناعي المتخصصة.

تتواجد برامج الذكاء الاصطناعي للمحادثة منذ بداية الذكاء الاصطناعي تقريبًا. كان البرنامج الأول برنامج العلاج النفسي الشهير، إلايزا، لجوزيف فايزنباوم عام ١٩٦٦. وتتميز روبوتات الدردشة الحديثة على الإنترنت بأنها مسلية بشكل مدهش. جرِّب، على سبيل المثال، الكمبيوتر اللغوي الاصطناعي المتصل بالإنترنت (المعروف اختصارًا باسم أليس). يمكن الوصول إلى روبوت محادثة مثير للاهتمام اليوم من خلال دمج خاصية التعرف على الكلام، وبرنامج لروبوتات الدردشة، وخاصية تركيب الكلام، ووحدة للتحكم في شفتَي الروبوت وتعبيرات وجهه، بحيث يبدو الروبوت كأنه يتحدث وتعكس تعابير وجهه ما يقوله.

هناك مثالان على هذا النوع من الروبوتات، التي طوَّرتها شركة هانسون روبوتكس: الروبوت فيليب كيه ديك والروبوت بينا ٤٨. ويثير الروبوت الأخير الاهتمام بشكل خاص لأن بينا روثبلات، وهي شخص حي، طلبت أن يحاكي رأس روبوت المحادثة رأسها. فالروبوت بينا ٤٨ (أو على وجه الدقة، برنامج المحادثة الخاص بالروبوت) «تدرَّب» حينها على ساعات من المحادثات بين بينا الحقيقية وبينا الروبوت. وقد أجْرَت مراسِلة صحيفة «نيويورك تايمز» إيمي هارمون مقابلةً شهيرة مع الروبوت بينا ٤٨ في عام ٢٠١٠. ومن الواضح أن المقابلة كانت محبطة للآمال بالنسبة لهارمون، ولكن كان يتخللها لحظات «نادرة (لكنها دومًا مثيرة) من الترابط». ويُبشِّر هذا الارتباط بين روبوتات الدردشة ذات الذكاء الاصطناعي وتكنولوجيا الروبوتات بتحقيق الكثير.

لكن المحادثة بين شخصين ليست مجرد تبادل للكلام. ولذلك يجب أن يكون الروبوت الرفيق قادرًا على قراءة وتفسير الإيماءات غير اللفظية ولغة الجسد وتعبيرات الوجه ونظرات عينَي سيدته، واستخدام تلك الإشارات التي غالبًا ما تكون مبهَمة كمدخلات إضافية تساوي كلماتها المنطوقة في الأهمية أو تزيد عنها.

تنتمي العديد من هذه الإيماءات ومعانيها على وجه الخصوص إلى لغة وثقافة إقليمية، لكن العديد منها فريد من نوعه بالنسبة للفرد وعلى الروبوت أن يتعلمها. ولذلك

سيحتاج الروبوت الرفيق المؤهل إلى التعرف على سيدته جيدًا، وللقيام بذلك نحتاج إلى تقنيات تفوق تقنية روبوتات الدردشة. يقودني هذا إلى اقتراح اكتشاف مهم سيكون ضروريًّا لجعل الروبوت الرفيق أقرب إلى الواقع، وهو: نظرية العقل الاصطناعية.

(٣-٥) نظرية العقل الاصطناعية

إن نظرية العقل هي المصطلح الذي يطلقه الفلاسفة وعلماء النفس على القدرة على تكوين نموذج تنبُّئي للآخرين. فمن خلال نظرية العقل، من المفترَض أن نكون قادرين على فهم الكيفية التي يتصرف بها الآخرون في ظروف معينة. ويمكننا التعاطف مع الآخرين لأن نظرية العقل تسمح لنا بتخيل أنفسنا في مواقف يتعرضون لها؛ ومن ثَم نشعر كما يشعرون.

ومع ذلك، فإن فكرة نظرية العقل ضعيفة تجريبيًّا؛ ونرى أنها، وما يشبهها، يجب أن تكون موجودة، ولكننا لا نملك سوى فهم مُبهَم للعمليات العصبية أو الإدراكية التي قد تشكل نظرية العقل. توفر الروبوتات الذكية نهجًا مثيرًا للاهتمام لنظرية العقل؛ لأنها تسمح لنا بطرح السؤال الآتي: «كيف يمكننا تطبيق نظرية العقل الاصطناعية في الروبوتات؟»

عندما وصفت الروبوت كرونوس في الفصل الرابع، أوضحت أن كرونوس لديه نموذج داخلي خاص به. والغرض من هذا النموذج الداخلي، وهو محاكاة بالكمبيوتر، هو السماح لكرونوس بتعلم كيفية التحكم في نفسه. ولكن إذا كان بإمكان الروبوت أن يمتلك نموذجًا داخليًّا لنفسه، فمن الناحية النظرية يمكنه أن يكوِّن نماذج للآخرين، بما في ذلك البشر. الآن يجب القول إن هذه خطوة كبيرة جدًّا. في الواقع، إنها تحتوي خطوة على عدة خطوات.

نحتاج أولًا أن ننتقل من روبوت لديه نموذج داخلي لنفسه إلى روبوت لديه نماذج داخلية لروبوتات أخرى تشبهه تمامًا. سيسمح مثل هذا النموذج للروبوت بالتنبؤ (من خلال تشغيل محاكاته) بأفعال الروبوت الآخر، وتعديل نموذجه إذا كان الروبوت الآخر يفعل شيئًا مختلفًا بالفعل. والخطوة التالية هي الانتقال من روبوت لديه نموذج داخلي لروبوتات أخرى إلى روبوت لديه نموذج داخلي لكيان آخر. وبالنسبة إلى الروبوت الرفيق، يجب أن يكون هذا الكيان الآخر، بالطبع، إنسانًا.

مرةً أخرى هذه خطوة كبيرة للغاية. (ربما تكون الروبوتات ذات النماذج التنبُّئية للحيوانات البسيطة مرحلةً متوسطة مفيدة.) والأكثر من ذلك أنه ليس هناك ما يضمن

أن الروبوت الذي يمتلك نموذجًا داخليًّا لإنسان معين سيثبت أنه «يعرف» ذلك الشخص. فما يُسمى بـ «محاكاة» نظرية العقل هي مجرد نظرية.

على الرغم من الصعوبة غير العادية لذلك الأمر، أعتقد أن الروبوت الرفيق المؤهل يجب أن يتمتع بنوع ما من نظرية العقل حتى يتمكن من إظهار تعاطف قابل للتصديق (أو مجاراة حقيقية). وقد يكون الروبوت الرفيق المزوَّد بنظرية العقل الاصطناعية محاورًا أكثر معرفة وتعاطفًا من أي شيء يمكن تصميمه باستخدام تقنية روبوت الدردشة.

من المثير للاهتمام التكهن بما سيكون عليه الروبوت الرفيق المزوَّد بنظرية العقل الاصطناعية. أعتقد أنه سيكون مقنعًا للغاية: فإيماءات الروبوت وتعبيرات وجهه وقدرته على قراءة لغة الجسد وتعديل سلوكه واستجاباته ليس فقط وفقًا لما تقوله سيدته والكيفية التي تقوله بها، ولكن أيضًا وفقًا للنموذج الخاص بها بداخله، يمكن أن يكون مزيجًا قويًّا وجذابًا (وكذلك خطيرًا).

وهنا يظهر السؤال الآتي: هل سيتمتع الروبوت الرفيق بذكاء اصطناعي بشري المستوى؟ إجابتي هي لا. فأنا لا أرى أي سبب يجعل الروبوت، على سبيل المثال، مبدعًا أو بديهيًّا، أو قادرًا على الخداع، أو الفرح، أو اليأس، أو أيٍّ من الصفات التي نربطها بالإنسان. وبالطبع، بعض هذه الصفات غير مرغوب فيها في الرفيق المثالي، ولكن الجانب السلبي هو أنه ربما لن يكون قادرًا على أن يكون فطنًا أو مُسليًا بشكل إبداعي. وربما يكون مملًّا بعض الشيء، لكنه من المحتمل جدًّا أن يكون روبوتًا رفيقًا مؤهلًا.

(٤) المغزى من علم الروبوتات

بالنسبة لي، تُعتبر الروبوتات وممارسة علم الروبوتات أمرًا في غاية الروعة؛ لأن الروبوتات تجسد ثلاث أفكار؛ أولًا: أن الروبوتات يمكن أن تكون «آلات مفيدة»؛ ثانيًا: أن الروبوتات يمكن أن تكون «نماذج عملية» من الحياة أو الذكاء أو التطور أو حتى الثقافة؛ وثالثًا: أن الروبوتات «تُحاكي» الحياة. تمثل الأفكار الثلاثة على التوالي وجهات نظر مختلفة حول علم الروبوتات — الهندسة والعلوم والفلسفة — ومن الأمور التي تبعث على الرضا العمل على الروبوتات التي قد تقدم رؤًى من جميع المنظورات الثلاثة.

لقد ركَّز جزء كبير من هذا الكتاب على المنظور الأول المتمثل في كيف تُستخدم الروبوتات الآن وكيف يمكن أن تكون ذات فائدة متزايدة في المستقبل، والتحديات التي يجب التغلب عليها، والتقنيات التي يجب اختراعها، قبل أن يتمكن علم الروبوتات من

تحقيق إمكاناته غير العادية. ولقد تطرقت إلى جوانب من المنظور الثاني أيضًا، لكنني لم أُطِل الحديث عنها لأن مدى مساهمة الروبوتات — كنماذج عملية — في الفهم العلمي لا يزال محدودًا. ومن الصعب العثور على أمثلة لا جدال فيها لعلم أحياء جديد، على سبيل المثال، ناتج عن نماذج روبوتية لعمليات حيوية.

ومع ذلك، يمكنني قول إن فكرة أن تكون الروبوتات نماذج عملية في مجال العلوم بدأت بجدية مع دبليو جراي والتر وسلاحفه الروبوتية عام ١٩٥٠. فليس هناك مثال أفضل من أن يصمم عالم للفسيولوجيا العصبية روبوتات لاختبار أفكار بشأن اتصالات المخ. وتظل هذه الفكرة تتسم بالجدية وتستحق الاستكشاف. في بعض الأحيان، أصف الروبوتات بأنها «محاكاة مجسدة»، وبنفس الطريقة التي تُعرف بها المحاكاة الآن، كأداة جادة للبحث العلمي مزودة بعلم محاكاة ناشئ؛ لذلك يجب أن نبحث عن نهج قائم على المبادئ لكيفية استخدام الروبوتات كنماذج عملية في مجال العلوم.

لكن اسمحوا لي أن أُنهي هذا الكتاب بالتفكير في الفكرة الثالثة، وهي: الفكرة الفلسفية عن الروبوتات بوصفها محاكاة للحياة. ربما يكون لهذه الفكرة صدًى أكبر في الثقافة الشعبية: فكر في عدد المرات التي نقرأ فيها عناوين أخبار عن الروبوتات التي تفكر أو تتعلم أو تشعر. فهذه العناوين تُغذي خيالات الخيال العلمي لدينا، لكننا نتفاعل أيضًا مع إثارة الخوف؛ حيث يبدو أن عالم الروبوتات الخيالي المرير أصبح أقرب قليلًا إلى الواقع. لكن إذا نحَّينا جانبًا موضوع الروبوتات المثير للاهتمام في الثقافة الشعبية، فهل سيكون للفكرة الفلسفية أي ميزة جادة؟ والإجابة هي نعم؛ لأن الروبوتات التي تتصرف كما لو كانت على قيد الحياة بطريقة ما تطرح أسئلة وجودية عميقة حول ما يعنيه أن تكون على قيد الحياة، وما يعنيه أن تختبر العالم بوعي ذاتي وأن تتمتع بقوة واستقلالية في العالم.

لم أتطرق في هذا الكتاب إلى أسئلة مثل ما إذا كان بإمكان الروبوتات التفكير أو الإدراك الذاتي أو حتى الوعي. فهذه أسئلة علمية وفلسفية مثيرة للجدل، ويبدو أنه حتى نتمكن من حل لغز كيف (أو هل) يمكن للحيوان أو الإنسان أن يكون واعيًا، فلا فائدة من محاولة تصميم روبوت واعٍ. وفي النهاية، إذا كنا لا نعرف ما الوعي، فكيف سنقيس ما إذا كان الروبوت يمتلكه أم لا؟

لكنني أرى أن علم الروبوتات يجب ألا يكتفي بالانتظار حتى تُحل هذه الأسئلة الصعبة. بل أعتقد أن علم الروبوتات يمكن أن يكون جزءًا من الحل. فمن خلال تصميم

الروبوتات التي تُظهر محاكاة أكثر إقناعًا للقدرة على التصرف والتكيف والوعي الذاتي، يمكننا، كما أعتقد، النظر إلى هذه الأسئلة الفلسفية من زاوية مختلفة. على سبيل المثال، في وصفي الموجَز للروبوت الرفيق البشري المستقبلي، اقترحت أنه سيحتاج إلى نظرية العقل الاصطناعية. ولكن هل سيكون مثل هذا الروبوت مدركًا لذاته، أو حتى واعيًا؟ برأيي قطعًا لا، لكنني أرى أن نظرية العقل الاصطناعية المجسدة يمكن أن تكون خطوة أولى مهمة نحو بناء الوعي الاصطناعي وفهم الوعي الطبيعي.

إن روبوتاتنا الحالية البشرية والحيوانية الشكل هي محاكاة بدائية زائفة في أحسن الأحوال، ولكن مع تقدم ممارسات علم الروبوتات ستصبح أقل بدائية. وفي مرحلة ما في المستقبل البعيد، سيصبح من الصعب استمرار الحجج القائلة إن الأشياء الاصطناعية المصممة لا يمكن أن تكون واعية. فكر في الروبوت البشري الخيالي داتا من «ستار تريك: الجيل القادم» (ستار تريك: ذا نكست جينيريشن): وهو روبوت يمكنك أن تعزف معه الموسيقى وتناقش الفلسفة وتبني علاقةَ صداقة تدوم لسنوات عديدة وتحزن عندما يختفي من الوجود. والسؤال هو: هل مثل هذا الروبوت ممكن نظريًّا؟

نعم، أعتقد أنه لا يوجد سبب من حيث المبدأ لعدم إمكانية تصميم الروبوتات البشرية أو تطويرها للتصرف كما لو كانت واعية بشكل مقنع لدرجة أنه يجب اعتبارها واعية بالفعل، في جميع المقاصد والأغراض. وبالطبع قد تجادل بقوة مثل هذه المحاكاة المثالية مع فيلسوف بشري بأنه مجرد روبوت وليس واعيًا حقًّا، ومن الأرجح أن يوافق الفيلسوف على ذلك. ولكن وفقًا لأي معايير بشرية عادية (مستنيرة)، سيكون مثل هذا الروبوت قادرًا أيضًا على كسب الثقة أو الاحترام أو حتى الهوية البشرية. ومن المؤكد أن مثل هذا الروبوت سيتحدى مفاهيمنا الراسخة حول معنى أن تكون إنسانًا.

مسرد المصطلحات

قائمة بالمصطلحات التقنية المستخدَمة في هذا الكتاب دون تعريفها.

الطباعة الثلاثية الأبعاد: تقنية لتصنيع أجزاء صلبة ثلاثية الأبعاد، تُجرى عادةً عن طريق حقن البلاستيك المنصهِر الساخن من فُوَّهة. تُحرَّك الفُوَّهة باستخدام الكمبيوتر ويُصنَّع الجزء الثلاثي الأبعاد من طبقات متتالية من البلاستيك المطبوع.

المُشغِّل: يُستخدم هذا المصطلح بشكل عام في علم الروبوتات للإشارة إلى أي جزء في الروبوت يعمل بمحرك؛ أي الآلية التي يستخدمها الروبوت للعمل في بيئته. ومن ثَم، فإن تشغيل الروبوت يعني جعله يتحرك.

الذكاء الاصطناعي: علم وهندسة الآلات الذكية، بما في ذلك أجهزة الكمبيوتر. ومن ثَم فإن علم الروبوتات هو فرع الذكاء الاصطناعي الذي يُعنى بالذكاء الاصطناعي المُضمَّن في أجسام.

روبوت الدردشة: برنامج كمبيوتر مُصمَّم لمحاكاة لغة المحادثة الطبيعية مع إنسان. وروبوت الدردشة هو مثال لأحد برامج الذكاء الاصطناعي.

الروبوتات الجماعية: المصطلح العام لمجموعة من الروبوتات المتعددة التي تعمل معًا كفريق أو مجموعة أو سرب لتحقيق مهمة ما.

نظام التحكم: الأجهزة التي تتحكم في الآلة لتحقق الوظائف المطلوبة منها، ويُقصَد بها عادةً الأجهزة الإلكترونية والبرامج.

المستجيب الطرفي: جهاز (أي أداة أو قابض) مثبت بنهاية ذراع الروبوت.

مستشعر بتأثير هول: مستشعر يغير خرجه استجابةً للمجال المغناطيسي.

مستشعر الأشعة تحت الحمراء: مستشعر قصير المدى يستخدم ضوء الأشعة تحت الحمراء المنعكس لقياس المسافة بين المستشعر والجسم.

ماسح بالليزر: في مجال علم الروبوتات، يُستخدم جهاز تحديد المدى بالليزر، وهو نوع من الماسح الليزري، لإنشاء مجموعة كبيرة من قياسات المسافات بين الماسح والأجسام الموجودة في بيئة الروبوت، عن طريق قياس الوقت اللازم لانعكاس كل نبضة من ضوء الليزر. ويُعرف أيضًا باسم جهاز الكشف عن الضوء وتحديد المدى.

مستشعر الاقتراب: الاسم العام للمستشعر الذي تتمثل وظيفته في اكتشاف وجود أجسام قريبة، دون لمسها فعليًّا. ويُعد مستشعر الأشعة تحت الحمراء مثالًا على مستشعر الاقتراب.

ميكانيكا الإلكترونيات: مصطلح يشير إلى نظام مشترك من الميكانيكا والإلكترونيات والبرمجيات.

وحدة التحكم الدقيقة: جهاز كمبيوتر (معالج دقيق) وذاكرة وواجهات إدخال وإخراج، مدمَجة في جهاز واحد يُستخدم في الأنظمة المدمجة.

المستشعر: جهاز يرصد جسمًا ماديًّا أو يقيسه ويحوله إلى إشارة كهربائية.

المحرك المؤازر: محرك مزوَّد بآلية مدمجة لإرسال الإشارات، تسمح بتمركز عمود خرج المحرك بدقة.

التنظيم الذاتي: عندما تتبع الروبوتات الفردية قواعد السلوك المحلية وينتج عن ذلك سلوك منظم من قِبل المجموعة بأكملها، دون الحاجة إلى تحكم خارجي، يُقال إن المجموعة منظمة ذاتيًّا.

الحضور عن بُعد: يُعرف الروبوت الذي تتمثل وظيفته الأساسية في إعطاء مستخدمه البشري، الذي يقوم بتشغيله عن بُعد، درجة من الحضور في موقع وجود الروبوت باسم «روبوت الحضور عن بُعد»؛ ويُطلَق عليه أحيانًا اسم «أفاتار».

قراءات إضافية

مقدمة عامة عن علم الروبوتات

Maja Matarić: *The Robotics Primer,* MIT Press, 2007. This book is a highly engaging and accessible semi-technical introduction to robotics, spanning all of the important concepts and applications.

Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, and Davide Scaramuzza: *Introduction to Autonomous Mobile Robots,* MIT Press, 2011. This is a comprehensive textbook on mobile robotics, ideal for anyone who wishes to understand robot motion, perception, and localization in greater technical depth.

الفصل الأول: ما الروبوت؟

Mark Elling Roshiem: *Leonardo's Lost Robots,* Springer, 2006. This beautifully illustrated book tells the extraordinary story of the reconstruction of Leonardo da Vinci's robots, including his programmable cart.

Philip Husbands, Owen Holland, and Michael Wheeler (eds): *The Mechanical Mind in History,* MIT Press, 2008. This is a fascinating and important account of the pioneers of intelligent machines, their work and ideas. It tells the story of how key ideas of bio-inspiration,

which I introduce in Chapter 3, were conceived by the mid 20th-century pioneers of cybernetics.

الفصل الثالث: الروبوتات الحيوية

Valentino Braitenberg: *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology,* MIT Press, 1984. A delightful book; the 'experiments' of the title are thought experiments of hypothetical autonomous vehicles.

Rodney A. Brooks: *Cambrian Intelligence: the Early History of the New AI,* MIT Press, 1999. This is a collection of Brooks's influential and very readable research papers from 1985 to 1991, with commentaries.

الفصل الرابع: الروبوتات التي تشبه البشر والروبوتات البشرية

Yoseph Bar-Cohen and David Hanson: *The Coming Robot Revolution: Expectations and Fears About Emerging Intelligent, Humanlike Machines,* Springer, 2009. A thought-provoking book which explores the larger societal implications of humanoid robotics.

Wendell Wallach and Colin Allen: *Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong,* Oxford University Press, 2008. This book provides a thorough and philosophically sound exploration of how we might build future ethical robots.

حاشية عن القسم الخاص بأخلاقيات الروبوتات

The set of five ethical principles for robotics outlined in this section were drafted by a joint Engineering and Physical Sciences (EPSRC) and Arts and Humanities Research Council (AHRC) working group on robot ethics, in 2010. The full report from that working group can be found at: http://www.epsrc.ac.uk/ourportfolio/themes/engineering/activities/Pages/principlesofrobotics.aspx

الفصل الخامس: أسراب الروبوتات، والتطور، والتكافل

Eric Bonabeau and Guy Théraulaz: *Swarm smarts, Scientific American,* March 2000. A very readable review of swarm intelligence.

Dario Floreano and Lawrent Keller: 'Evolution of Adaptive Behaviour in Robots by Means of Darwinian Selection', *PLoS Biology,* Vol. 8, 2010. A very accessible article on evolving adaptive robot behaviours.

الفصل السادس: مستقبل علم الروبوتات

Paolo Dario and Arianna Menciassi: 'Robot Pills', *Scientific American,* August 2010. For an up-to-date review of research in pill-sized medical robots.

K. Eric Drexler: *Engines of Creation: the Coming Era of Nanotechnology,* Oxford University Press, 1990. Now regarded as a classic, this is a highly readable exploration of how nano-machines might be built and applied.

مصادر إضافية أخرى للقراءة

Dario Floreano and Claudio Mattiussi: *Bio-inspired Artificial Intelligence,* MIT Press, 2008. A substantial textbook, but also a readable and comprehensive introduction to bio-inspired approaches to artificial intelligence and robotics; for anyone who wants a deeper understanding of these important new approaches this book is a must.

Rolf Pfeifer and Josh Bongard: *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence,* MIT Press, 2006. This clear and thoughtful book sets out the case for 'embodiment': that intelligence, in animals and robots, always requires a body. Its conclusions go well beyond robotics.

David McFarland: *Guilty Robots, Happy Dogs,* Oxford University Press, 2008. Written by an influential zoologist, this book is concerned with philosophy of mind. Written in an accessible and refreshing style, it is a very nice introduction to machine consciousness.

المصادر المتوفرة عبر الإنترنت

Almost all of the robots and projects outlined in this book can be found on the Internet via a quick search. I also recommend:

Robots podcast: http://www.robotspodcast.com/

Interviews and background information, including video clips, with many of the world's leading roboticists.

Automation blog: http://spectrum.ieee.org/blog/robotics/robotics-software/automaton

An award-winning robotics blog from the IEEE.

The robot report: http://www.therobotreport.com/

A business-oriented website with news and links to robotics companies and research organizations.

Robotics News Service: http://www.hizook.com/

The author's blog: http://alanwinfield.blogspot.com/

Which includes a web page with additional links and resources for this book.

مصادر الصور

(1–1) The e–puck educational mobile robot

(1–2) The ‘nervous system’ of the e–puck robot

(1–3) Replicas of Grey Walter’s robot tortoises. (Robots built by Ian Horsfi eld and Chris Hart)

(2–1) Industrial assembly–line robots (© Small Town Studio/Shutterstock.com).

(2–2) The Aethon TUG hospital portering robot (© Art Montes De Oca/Aethon).

(2–3) Mars exploration rover(© NASA/JPL–Caltech).

(2–4) Lego Mindstorms NXT ‘central nervous system’ (© LEGO Group).

(3–1) The robot–world feedback loop.

(3–2) Ecobot III: a robot with an artificial digestive system. The inset image shows a single MFC (Reproduced with permission of Ioannis Ieropoulos, John Greenman, and Chris Melhuish).

(3–3) Scratchbot, a robot with artificial whiskers (Reproduced with permission of Martin Pearson and Tony Pipe).

(4–1) BERT II torso fi tted with the BRL digital head, an upper–body humanoid robot for research in human–robot cooperation (Reproduced with permission of Chris Melhuish and Graham Whiteley).

(4–2) Kismet, an expressive robot head for research in social human–robot interaction (Donna Coveney/MIT).

(4–3) Jules, an expressive highfi delity android robot head (Reproduced with permission of David Hanson).

(4–5) The Uncanny Valley (Reproduced with permission of Karl MacDorman).

(4–6) Paro, a robot baby seal (© AIST, Japan).

(4–7) Cronos, an anthropomimetic humanoid robot (Reproduced with permission of Owen Holland)

(5–1) The Swarmanoid robots. Left: 3 Foot–bots and a Hand–bot. Right: the Eye–bot (Reproduced with permission of Marco Dorigo).

(5–2) The four stage process of evolutionary robotics.

(5–3) In the Golem project a robot is evolved in simulation (top) then the fi nal best individual, is fabricated (bottom) (Reproduced with permission of Hod Lipson, Cornell University).

(5–4) Alice robot (A) and its artificial neural network controller (B) (Reproduced with permission of Markus Waibel and Dario Floreano).

(5–5) A Symbrion organism. Top: a visualization of the 3D organism. Bottom: Symbrion Backbone and Active wheel robots in the process of autonomous self–assembly (Reproduced with permission of Paul Levi, Lutz Winkler, and Wenguo Liu).

(5–6) Simulated Nao humanoid robots playing 3–a–side football in the simulator Webots (Reproduced with permission of Olivier Michel).

هنـــداوي