الفصل

الخامس عشر

علم الروبوت والذكاء الاصطناعي

ويشتمل هذا الفصل على النقاط التالية:

- ✓ مقدمة
- ✓ فئات الربوتات
- ✓ مكونات الروبوت
- ✓ التعلم الآلي وإدراك الروبوت
- ✓ التخطيط لحركات الربوتات
- ✓ حركة الربوتات
- ✓ العمليات السوفيتية الروبوتية

الفصل الخامس عشر

علم الروبوت والذكاء الاصطناعي

الروبوتات هي العوامل المادية التي تؤدي المهام عن طريق التلاعب في العالم المادي، وللقيام بذلك، فهي مجهزة مع المستجيبات، مثل الساقين، والعجلات، والمفاصل، والقابضين، وللربوتات غرض واحد، وهو تأكيد القوى الفيزيائية على البيئة، كما أن الروبوتات مزودة بأجهزة استشعار، مما يسمح لها بإدراك بيئتها، وقد زودت الروبوتات حاليا بمجموعة متنوعة من أجهزة الاستشعار، بما في ذلك الكاميرات والليزر لإدراك البيئة، وأجهزة الجيروسكوب ومقاييس السرعة لقياس حركة الروبوت الخاصة.

فئات الربوتات:

وتقع معظم أجهزة الروبوت اليوم في واحدة من ثلاث فئات أساسية.

الفئة الأولى: هم المتلاعبون، أو أذرع الروبوت، انظر الشكل التالي.

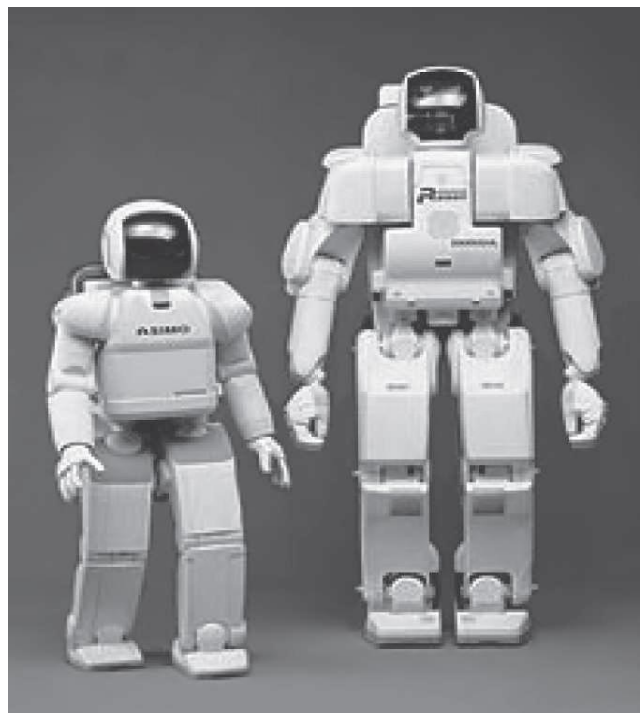
مناور آلي روبوتي لتكديس الأكياس على منصة نقالة

كما ترتكز بدنيًا على أماكن عملهم، على سبيل المثال في خط تجميع المصانع أو على محطة الفضاء الدولية.

عادة ما تتضمن حركة المناورة سلسلة من المفاصل التي يمكن السيطرة عليها، مما يمكن هذه الروبوتات من وضع مفاعلاتها في أي موضع داخل مكان العمل، وأما المتلاعبون فإنهم أكثر أنواع الروبوتات الصناعية شيوعًا، حيث يوجد ما يقرب من مليون وحدة في جميع أنحاء العالم. وتستخدم بعض المتلاعبين المحمول في المستشفيات لمساعدة الجراحين، كما يمكن لعدد قليل من مُصنعي السيارات البقاء على قيد الحياة دون المتلاعب الروبوتية، وقد تم استخدام بعض المتلاعبين لتوليد العمل الفني الأصلي.

الفئة الثانية: هي الروبوت المحمول، وتتحرك هذه الروبوتات في بيئتها باستخدام العجلات أو الأرجل أو الآليات المشابهة، وقد تم استخدامهم لتوصيل الطعام في المستشفيات، ونقل الحاويات في أرصفة التحميل، ومهام مماثلة.

إن المركبات البرية غير المأهولة، أو محركات UGV، تقود بشكل مستقل في الشوارع والطرق السريعة والطرق الوعرة، كما أنه تم استكشاف المسبار الكوكبي المبين في الشكل التالي لكوكب المريخ لمدة 3 أشهر في عام 1997.

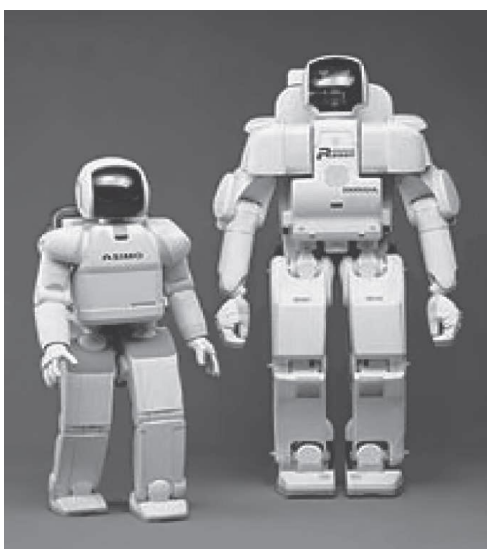


روبوتات "هوندا P3" و"روبوتات اسيمو"

وهناك أنواع أخرى من الروبوتات المتنقلة تشمل المركبات الجوية غير المأهولة (الطائرات بدون طيار)، وتستخدم عادة للمراقبة، رش المحاصيل، وغير ذلك من المهام الأخرى.

في الشكل التالي نرى الروبوت "بريداتور"، مركبة جوية بدون طيار (UAV) المستخدمة من قبل الجيش الأمريكي، وهو روبوت متحرك يستكشف سطح المريخ في تموز/ يوليه 1997.

العمليات العسكرية، كما هو موضح في الشكل التالي طائرة بدون طيار شائعة الاستخدام من قبل الجيش الأمريكي، وتستخدم المركبات تحت الماء المستقلة (AUVs) في استكشاف أعماق البحار، كما تعمل روبوتات الهاتف المحمول على توصيل الحزم في مكان العمل وفراغ الأرضيات في المنزل، في حين نجد النوع الثالث من الروبوت يجمع بين التنقل والتلاعب، وغالبا ما يسمى "مناور المحمول".



الروبوتات البشرية تحاكي الجذع البشري، ويوضح الشكل التالي اثنين من الروبوتات البشرية في وقت مبكر، تصنعها شركة "هوندا" في اليابان، أو غيرها، والمتلاعبون المحمولة يمكن تطبيق مفاعلاتهم في أماكن أبعد من المتلاعبين المرساة، لكن مهمتهم تصبح أكثر صعوبة لأنهم لا يمتلكون الصلابة التي توفرها المرساة.

الفئة الثالثة: يشمل مجال الروبوتات أيضًا الأجهزة التعويضية (الأطراف الاصطناعية والأذنين والعينين للإنسان) والبيئات الذكية (مثل المنزل بالكامل المزوّد بأجهزة استشعار ومؤثرات) والأنظمة متعددة الأجسام، حيث يتم تحقيق الحركة الآلية من خلال أسراب صغيرة من الروبوتات المتعاونة، ويجب أن تتعامل الروبوتات الحقيقية مع البيئات التي يمكن ملاحظتها جزئيًا، بشكل عشوائي، وديناميكي، ومستمر، لأن العديد من بيئات الروبوت متسلسلة ومتعددة أيضا، وعن الملاحظة الجزئية والاستوكاستك فهي نتيجة للتعامل مع عالم كبير ومعقد، في حين آخر لا تستطيع كاميرات روبوت الرؤية حول الزوايا، وتخضع أوامر الحركة إلى عدم اليقين بسبب الانزلاق الذي ينزلق، والاحتكاك، وما إلى ذلك، كذلك، يرفض العالم الحقيقي العمل بعناد أسرع من الوقت الحقيقي في بيئة محاكية.

ومن الممكن استخدام خوارزميات بسيطة (مثل خوارزمية Q-learning) للتعلم في بضع ساعات للمعالج من ملايين التجارب في بيئة حقيقية، قد يستغرق الأمر سنوات لإجراء هذه التجارب، علاوة على ذلك، تسبب الأعطال الحقيقية.

على عكس المحاكاة، تحتاج الأنظمة الروبوتية العملية إلى تجسيد المعرفة المسبقة عن الروبوت، وبيئته المادية، والمهام التي سيؤديها الروبوت حتى يتمكن الروبوت من التعلم بسرعة والأداء بأمان، فهي تجمع العديد من المفاهيم، بما في ذلك تقدير الحالة الاحتمالية والإدراك والتخطيط والتعلم غير الخاضع للإشراف وتعلم التعزيز.

مكونات الروبوت:

يتكون الربوت من مجموعة من الأجزاء نذكرها بالتفصيل فيما يلي:

أولا: المجسات(أجهزة الاستشعار):

أجهزة الاستشعار هي الواجهة الإدراكية بين الروبوت والبيئة، ومن أجهزة الاستشعار الفعالة، الكاميرات، فهي تعمل كمراقبين حقيقيين للبيئة؛ فهي تلتقط الإشارات التي تولدها مصادر أخرى في البيئة.

وإن أجهزة الاستشعار النشيطة، مثل السونار، ترسل الطاقة إلى البيئة، وتعتمد على حقيقة أن هذه الطاقة تنعكس مرة أخرى على جهاز الاستشعار، كما تميل أجهزة الاستشعار النشطة إلى توفير معلومات أكثر من أجهزة الاستشعار غير الفعالة، ولكن على حساب زيادة استهلاك الطاقة ومع وجود خطر التداخل عند استخدام أجهزة استشعار نشطة متعددة في نفس الوقت، سواء كانت نشطة أو سلبية.

يمكن تقسيم المستشعرات إلى ثلاثة أنواع، اعتمادًا على ما إذا كانوا يستشعرون البيئة، أو موقع الروبوت، أو التكوين الداخلي للروبوت، فإن أجهزة اكتشاف المدى هي أجهزة استشعار تقيس المسافة للأجسام القريبة.

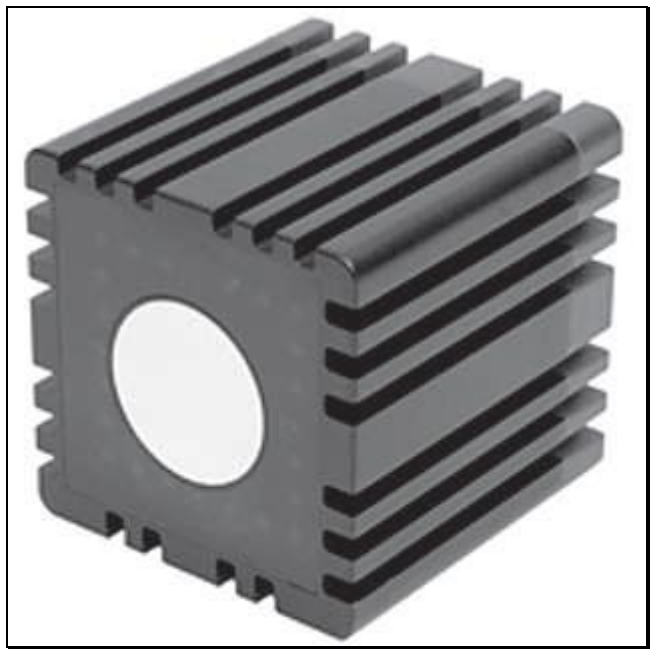
الفئة الأولى:

وفي الأيام الأولى من الروبوتات، كانت أجهزة الروبوت مجهزة عادة بأجهزة استشعار السونار، حيث تقوم مستشعرات سونار بنشر موجات صوتية اتجاهية، كما تنعكس من خلال الكائنات مع بعض الأصوات التي تصنعها أثناء العودة إلى جهاز الاستشعار، ويشير وقت وشدة الإشارة العائدة إلى المسافة إلى الأجسام القريبة.

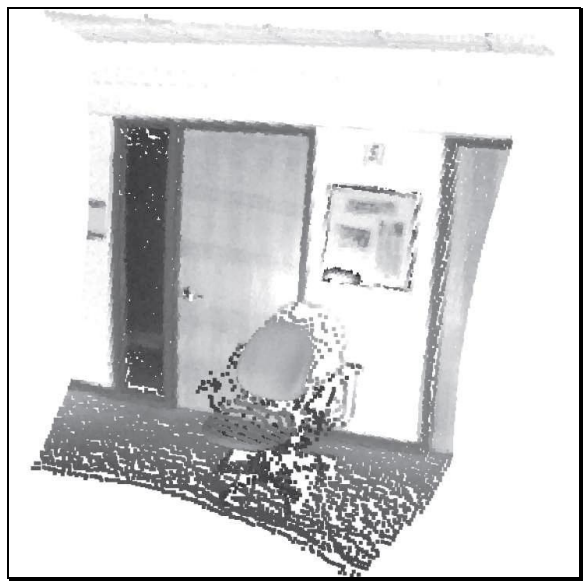
"سونار" هي التكنولوجيا المفضلة للمركبات تحت الماء المستقلة، لأنها تعتمد رؤية الاستريو على كاميرات متعددة لتصوير البيئة من وجهات نظر مختلفة قليلاً، وتحليل الاختلاف في المنظر في هذه الصور لحساب نطاق الكائنات المحيطة.

أما بالنسبة إلى الروبوتات الأرضية المتحركة، فنادرًا ما يتم استخدام السونار ورؤية الاستريو نظرًا لأنها غير دقيقة بشكل موثوق، وقد تم تجهيز معظم الروبوتات الأرضية الآن بموزع المدى البصري، تمامًا مثل مستشعرات السونار، تُصدر مستشعرات النطاق البصري إشارات نشطة (الضوء) تقيس الوقت حتى يصل انعكاس هذه الإشارة إلى المستشعر.

يوضح الشكل التالي كاميرا الطيران



تستحوذ هذه الكاميرا على صور المدى مثل الصورة الموضحة في الشكل التالي بمعدل 60 إطارًا في الثانية.



وتستخدم أجهزة استشعار أخرى للمجموعة مثل عوارض الليزر وكاميرات خاصة ذات (1 بيكسل) يمكن توجيهها باستخدام الترتيبات المعقدة للمرايا أو العناصر الدوارة، وتسمى هذه المستشعرات lidars (اختصارًا للكشف عن الضوء وتحديد المدى)، ويميل اللامرار الممسوح ضوئيًا إلى توفير نطاقات أطول من وقت كاميرات الطيران، ويميل إلى الأداء بشكل أفضل في ضوء النهار الساطع.

وتشمل أجهزة الاستشعار الأخرى شائعة المدى الرادار، والذي غالبا ما يكون هو المستشعر المفضل للطائرات بدون طيار، كما يمكن لأجهزة استشعار الرادار قياس المسافات لعدة كيلومترات،

على الطرف الآخر من أجهزة الاستشعار عن بعد هو أجهزة استشعار اللمس مثل الشعيرات، والجلد الحساس الذي يعمل باللمس، وتقيس هذه المجسات المدى بناءً على الاتصال الجسدي، ويمكن نشرها فقط من أجل استشعار الأشياء القريبة جدًا من الروبوت.

الفئة الثانية:

وهي فئة مهمة من أجهزة الاستشعار هي أجهزة استشعار الموقع، حيث تستخدم معظم أجهزة استشعار الموقع استشعار النطاق كمكون أساسي لتحديد الموقع في الخارج، ويعد نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) هو المثال الأكثر شيوعًا، ويقيس GPS المسافة إلى الأقمار الصناعية التي تصدر إشارات نابضة.

في الوقت الحاضر، هناك 31 قمرا صناعيا في المدار، تنقل إشارات على ترددات متعددة، وتستطيع أجهزة استقبال النظام العالمي تحديد المواقع عن طريق استعادة المسافة إلى هذه الإشارات عن طريق تحليل نوبات الطور بتثليث الإشارات من GPS ويمكن للمستقبلات تحديد موقعها المطلق على الأرض على بعد بضعة أمتار.

يشتمل نظام GPS التفاضلي على مستقبل أرضي ثانٍ ذي موقع معروف، مما يوفر دقة ملليمتر في ظل ظروف مثالية، لسوء الحظ لا يعمل GPS في الداخل أو تحت الماء، فيتم

تحقيق التعريب في كثير من الأحيان من خلال ربط المنارات في البيئة في المواقع المعروفة، ثم تمتلئ العديد من البيئات الداخلية بالمحطات الأساسية اللاسلكية، والتي يمكن أن تساعد الروبوتات في التعريب عبر تحليل الإشارة اللاسلكية تحت الماء، كما يمكن أن توفر منارات السونار النشطة إحساسًا بالموقع، وذلك باستخدام الصوت لإعلام الـ AUVs بمسافاتها النسبية إلى تلك المنارات.

الفئة الثالثة

المهمة هي أجهزة الاستشعار التحسسية، التي تبلغ الروبوت من تلقاء نفسها لقياس التكوين الدقيق للمفصل الآلي، غالباً ما يتم تجهيز المحركات مع أجهزة فك رموز العمود التي تعد ثورة المحركات بزيادات صغيرة على أذرع الروبوت، ويمكن أن توفر أجهزة فك رموز العمود معلومات دقيقة على أي فترة زمنية، في روبوتات الهواتف المحمولة، يمكن استخدام أجهزة فك التشفير التي تنقل تقارير عن ثورات العجلات لقياس المسافات مثل قياس المسافة المقطوعة، ولسوء الحظ، تميل العجلات إلى الانجراف والانزلاق، لذا فإن قياس المسافات غير دقيق فقط عبر مسافات قصيرة، مع القوى الخارجية، مثل التيار من أجل AUVs والرياح للطائرات بدون طيار، فتزيد من عدم اليقين الموضعي.

تتميز أجهزة الاستشعار بالقصور الذاتي، مثل الجيروسكوبات، على مقاومة الكتلة لتغير السرعة، كما يمكن أن تساعد في الحد من عدم اليقين، ويتم قياس الجوانب الهامة الأخرى لحالة الإنسان الآلي من خلال أجهزة استشعار القوة وعزم الدوران، حيث لا يمكن الاستغناء عنها عندما تتعامل الروبوتات مع الأشياء التي يكون شكلها وموقعها غير معروفين.

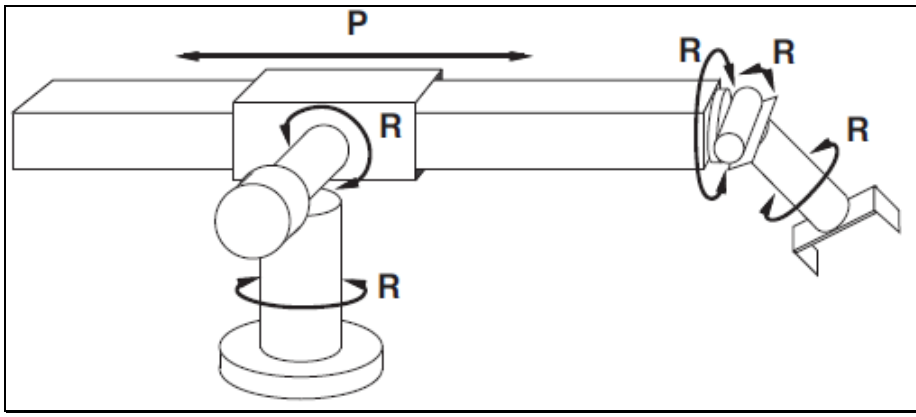
وتخيل أحد المناورات الروبوتية في مصباح كهربائي، وسيكون من السهل للغاية تطبيق الكثير من القوة وكسر اللمبة. وقد تسمح أجهزة استشعار القوة للإنسان أن يدرك مدى صعوبة احتجاز المصباح، كما تسمح مستشعرات العزم بإحساس مدى صعوبة تحوله، ويمكن لأجهزة الاستشعار الجيدة قياس القوى في جميع الاتجاهات الثلاثة متعدية

وثلاثية الدوران، إنهم يفعلون ذلك بتردد عدة مئات من المرات في الثانية، بحيث يتمكن الروبوت من اكتشاف القوى غير المتوقعة بسرعة وتصحيح أفعاله قبل أن يكسر مصباحًا ضوئيًا.

ثانيا: المؤثرات (المنشطات):

المنشطات هي الوسيلة التي تتحرك بها الروبوتات وتغير شكل أجسامها، ولفهم تصميم المستجيبات، مما يساعد على التحدث عن الحركة والشكل، باستخدام مفهوم درجة الحرية (DOF) نحسب درجة واحدة من الحرية لكل اتجاه مستقل يكون فيه الروبوت، أو أحد المستجيبين، ويمكن أن تتحرك على سبيل المثال، لدى روبوت متنقل جامد مثل AUV ست درجات من الحرية، وثلاثة لموضعه (x، y، z) في الفضاء وثلاثة لاتجاهه الزاوي، والمعروف باسم yaw، وroll، وpitch، تحدد هذه الست درجات الحالة الديناميكية، أو وضع الروبوت، وتشمل الحالة الديناميكية للإنسان هذه الستة بالإضافة إلى ستة أبعاد إضافية لمعدل التغيير لكل بعد حركي، أي سرعاتها بالنسبة للهيئات غير الجامدة.

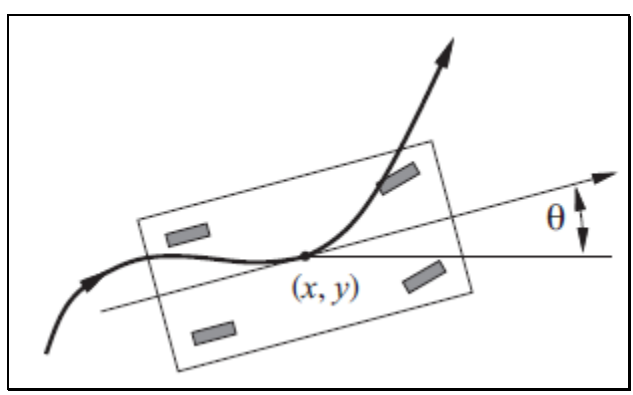
هناك درجات إضافية من الحرية داخل الروبوت نفسه. على سبيل المثال، يمتلك مرفق ذراع الإنسان درجتين من الحرية، يمكن ثني الذراع العلوي نحوه أو بعيد عنه، ويمكن تدويرها اليمين أو اليسار، المعصم له ثلاث درجات من الحرية يمكن أن تتحرك صعوداً وهبوطاً، جنباً إلى جنب، ويمكن أيضاً تدوير مفاصل الروبوت أيضاً درجة واحدة أو اثنتين أو ثلاث درجات من الحرية، فلكل منها مطلوب ست درجات من الحرية لوضع كائن، مثل اليد، عند نقطة معينة في اتجاه معين، مثل الذراع في الشكل التالي لديه ست درجات من الحرية، تم إنشاؤها بواسطة خمسة مفاصل متجذرة تولد حركة دورانية ومفصل منشوري واحد يولد حركة انزلاقية، يمكنك التحقق من أن ذراع الإنسان ككل لديها أكثر من ست درجات من الحرية من خلال تجربة بسيطة: ضع يدك على الطاولة ولاحظ أنه لا يزال لديك الحرية لتدوير المرفق دون تغيير تكوين يدك.



المتلاعبون الذين لديهم درجات إضافية من الحرية أسهل في التحكم من الروبوتات مع الحد الأدنى من عدد DOFs فقط لذلك، فإن العديد من المتلاعبين الصناعيين يمتلكون سبع صناديق فرعية، وليس ستة بالنسبة للروبوتات المتنقلة، ولا تكون دالات السحب المباشر بالضرورة نفس عدد عناصر الدفع.

ضع في اعتبارك، على سبيل المثال، متوسط سيارتك: يمكن أن يتحرك للأمام أو للخلف، ويمكن أن يتحول، مع إعطائه سيارتي DOFs في المقابل، يكون التكوين الحركي للسيارة ثلاثي الأبعاد: على سطح مستو مفتوح، يمكن للمرء بسهولة مناورة السيارة إلى أي نقطة (س، ص)، في أي اتجاه.

انظر الشكل التالي



وهكذا، فإن السيارة لديها ثلاث درجات فعالة من الحرية ولكن يوجد اثنين فقط من درجات الحرية.

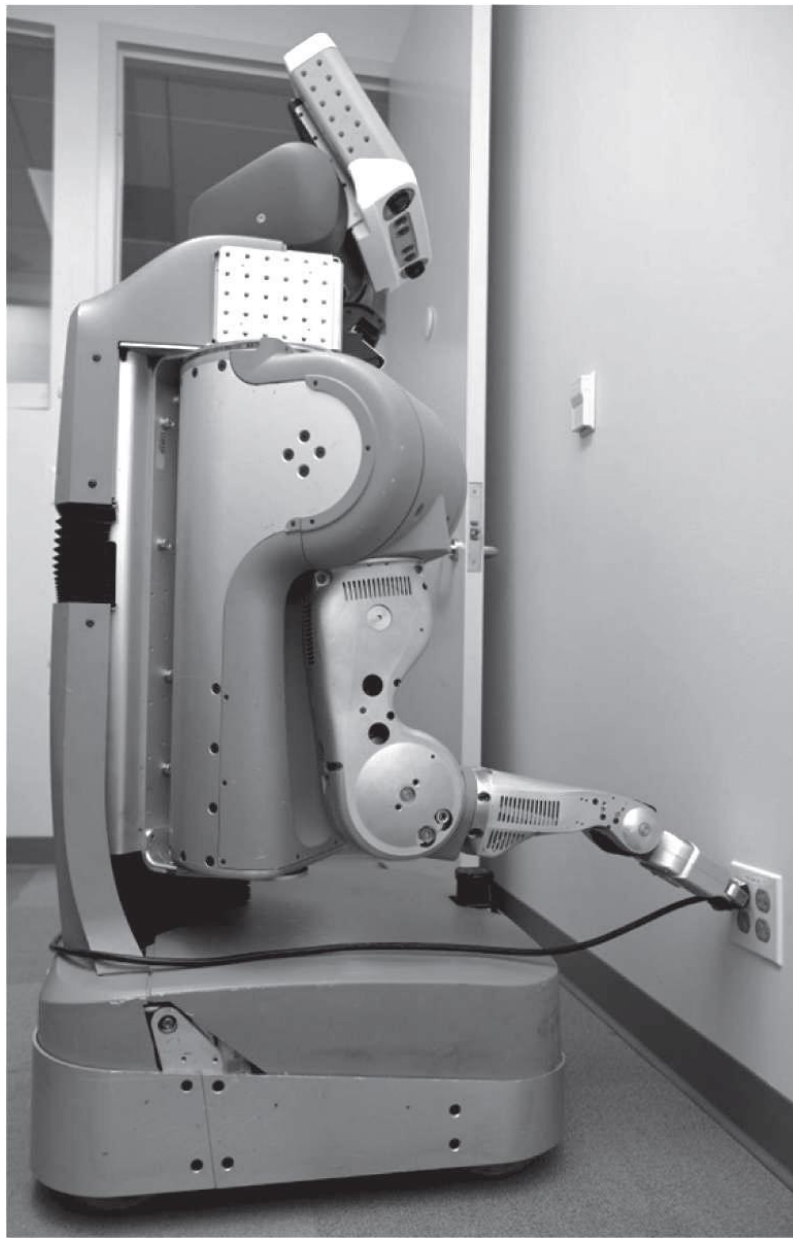
نقول إن الروبوت هو غير فني إذا كان يحتوي على ملفات DOFs أكثر فاعلية من ملفات DOFs التي يمكن التحكم بها وموضوعية إذا كان الرقمان متماثلين، فمن الأسهل التحكم في الروبوتات الآلية، وسيكون من الأسهل بكثير ركن السيارة التي يمكن أن تتحرك جانبيا، وكذلك إلى الأمام والخلف، لكن الروبوتات الآلية هي أيضا أكثر تعقيدا ميكانيكيا.

إن معظم أذرع الروبوتات هي أدوات مبدئية، ومعظم الروبوتات المتحركة غير متخصصة، فتجد لدى الروبوتات المتحركة مجموعة من آليات الحركة، بما في ذلك العجلات والمسارات والساقين، وتمتلك روبوتات القيادة التفاضلية عجلتين مدفوعتين بشكل مستقل (أو مسارات)، واحدة على كل جانب، كما في الدبابة العسكرية، فإذا تحركت كلتا العجلتين بنفس السرعة، يتحرك الروبوت على خط مستقيم، وإذا تحركوا في اتجاهين متعاكسين، يتحول الروبوت على الفور، والبديل هو محرك التزامن، حيث يمكن لكل عجلة التحرك حول محورها الخاص لتجنب الفوضى، ويتم تنسيق العجلات بإحكام عندما تتحرك بشكل مستقيم، على سبيل المثال، تشير جميع العجلات في نفس الاتجاه وتتحرك بنفس السرعة، كل من محركات الأقراص التفاضلية والمتزامنة.

بعض الروبوتات الأكثر تكلفة تستخدم محركات الأقراص ذات الطراز العالمي، والتي لديها ثلاث عجلات أو أكثر يمكن توجيهها ونقلها بشكل مستقل، وبعض روبوتات الهواتف المحمولة تمتلك أسلحة.

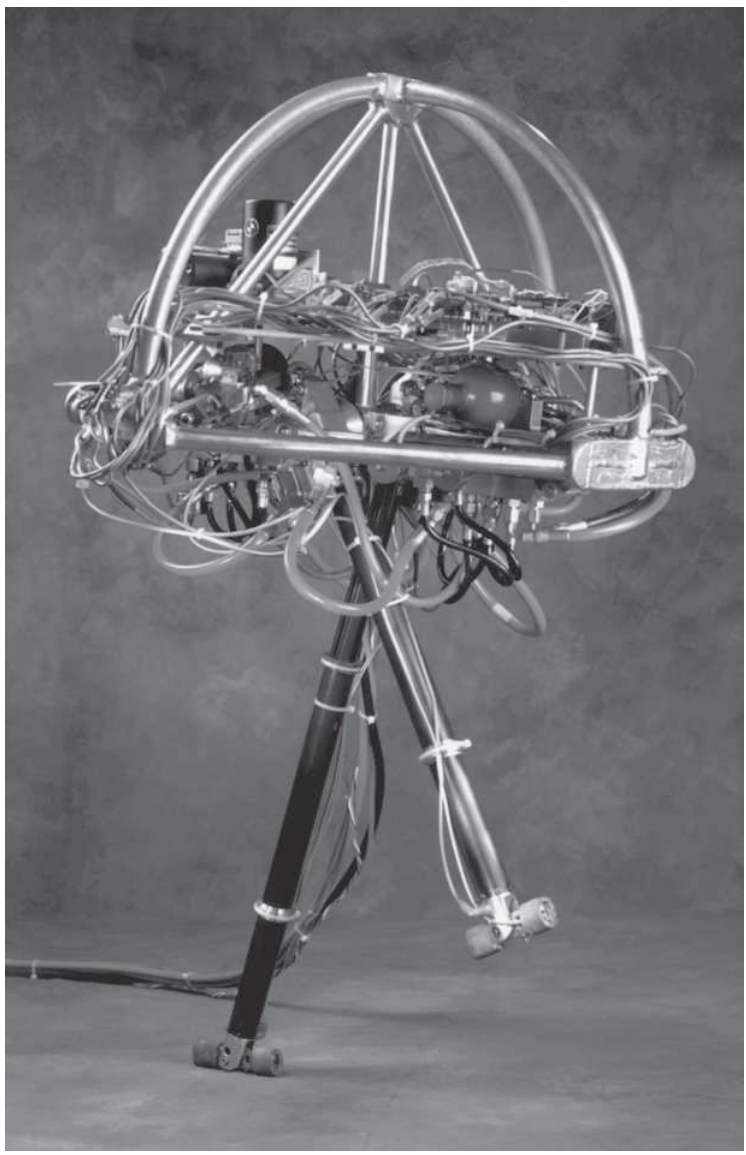
تستخدم الأسلحة الروبوتية للتعويض عن الجاذبية، وتوفير الحد الأدنى من المقاومة للقوى الخارجية، ومثل هذا التصميم يقلل من الخطر المادي على الأشخاص الذين قد يتعثرون في مثل هذا الروبوت.

انظر الشكل التالي يعرض روبوتًا مسلحًا.



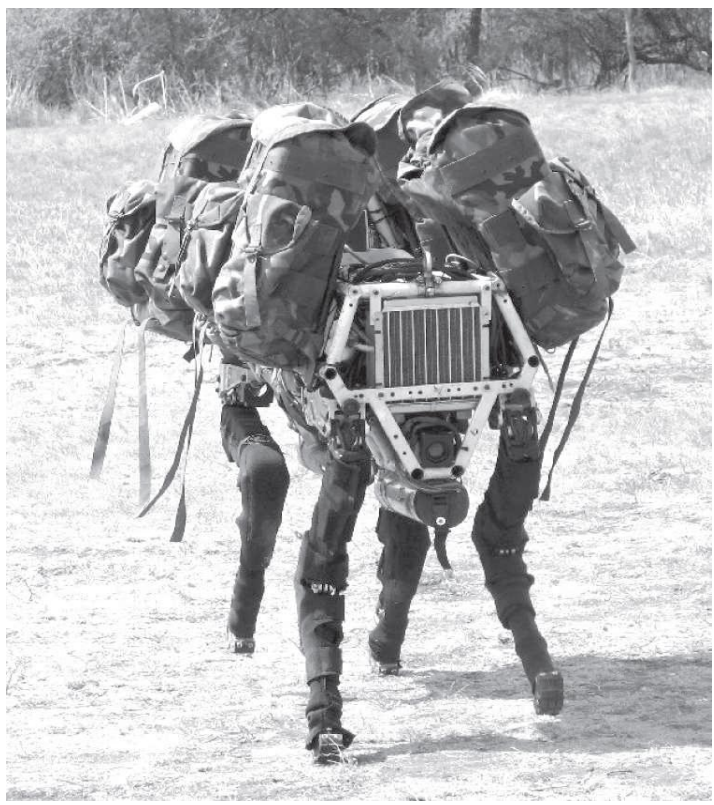
هذا هو الاعتبار الرئيس في نشر الروبوتات في البيئات المحلية، ويمكن للأرجل، على عكس العجلات، حيث التعامل مع التضاريس الوعرة. ومع ذلك، فإن الأرجل تكون بطيئة السرعة على الأسطح المستوية، وهي صعبة الإنشاء ميكانيكياً.

حاول الباحثون في مجال الروبوتات اكتشاف علامات تتراوح من ساق واحدة إلى عشرات الأرجل، وفعلا فلقد تم صنع الروبوتات المسطحة للمشي والركض وحتى القفزة كما نرى مع الروبوت المبتور في الشكل التالي.



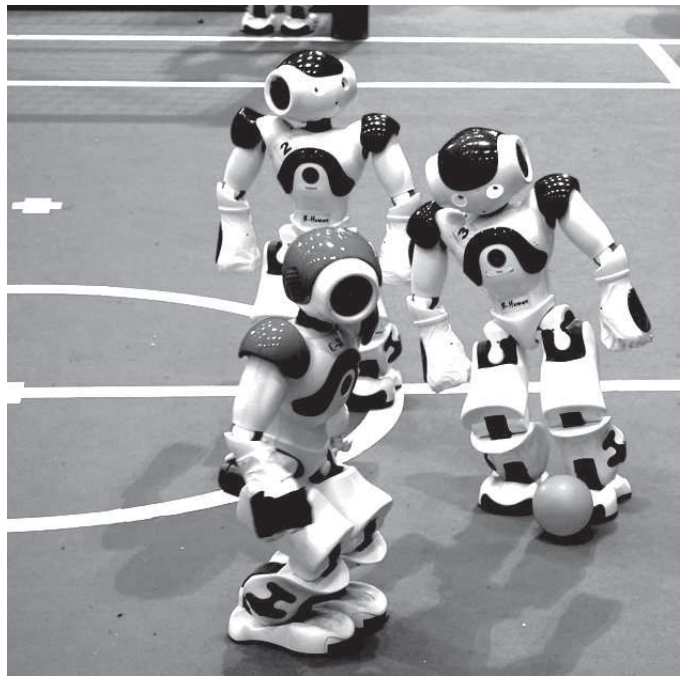
فهذا الروبوت مستقر بشكل حيوي، مما يعني أنه يمكن أن يبقى منتصبا أثناء التنقل، إلا أن الروبوت الذي يمكن أن يبقى مستقيماً دون تحريك أرجله يسمى ثابتاً بشكل ثابت، ويكون الروبوت آليًا ثابتًا إذا كان مركز ثقله فوق المضلع الممتد من ساقيه.

وقد يبدو الروبوت (رباعي الأرجل) كما المبين في الشكل التالي ثابتًا بشكل ثابت.



ومع ذلك، فإنه يمشي عن طريق رفع أرجل متعددة في نفس الوقت، مما يجعله مستقرًا ديناميكيًا، كما يمكن للإنسان الآلي السير على الثلج والجليد، ولن يسقط حتى لو طردته.

الروبوتات ذات الساقين مثل تلك الموجودة في الشكل التالي هي مستقرة ديناميكياً، وهناك طرق أخرى للحركة ممكنة.



تستخدم المركبات الجوية مراوح أو توربينات؛ وتستخدم المركبات غير المستخدمة في المياه المراوح أو الحشوات، على غرار تلك المستخدمة في الغواصات، فإن المناطيد الروبوتية تعتمد على التأثيرات الحرارية للحفاظ على نفسها وعلى أجهزة الاستشعار.

والمستجيبات وحدها لا تصنع روبوتًا، فالروبوت الكامل يحتاج أيضًا إلى مصدر قوة لدفع مفاعليها، وبالنسبة للمحرك الكهربائي فهو الآلية الأكثر شيوعًا لكل من عمليات التحريك، ولكن التشغيل الهوائي باستخدام الغاز المضغوط والتحكم الهيدروليكي باستخدام السوائل المضغوطة يكون له أيضًا منافذ للتطبيقات.

ثالثا: التصور الروبوتي (الإدراك الحسي):

الإدراك الحسي هو مكون أساسي من مكونات الروبوت حقيقي، حيث يعني أن يكون الربوت قادراً على إدراك البيئة والرد عليها والتصرف حيالها.

وعادة ما تتضمن هذه التفاعلات حركة، وهذه مهمة أساسية للروبوتات. كما هو

شائع في علوم أجهزة الكمبيوتر، غالباً ما يتم تمثيل حالات الأنظمة الإلكترونية بواسطة 1s , 0s أو الأرقام الثنائية.

واعتمادا على عدد من هذه المحسات المعنية، هناك مجموعات من التصورات (حالات أجهزة الاستشعار) التي يمكن أن تكون الروبوت.

وتستخدم أجهزة الاستشعار لتمثيل الحالة الداخلية والخارجية للروبوت. ويشير العالم الداخلي إلى حالة الروبوت الخاصة كما يراها. وتشير الحالة الخارجية إلى كيفية إدراك الروبوت للعالم الذي يتفاعل معه.

ويمثل تمثيل الدول الداخلية والخارجية (أو النماذج الداخلية) للروبوتات مسألة تصميم مهمة.

رابعا: التعريب ورسم الخرائط (الاستكشاف):

التوطين هو مشكلة اكتشاف أماكن الأشياء بما في ذلك الروبوت نفسه، إن المعرفة حول مكان الأشياء هي جوهر أي تفاعل فيزيائي ناجح مع البيئة. على سبيل المثال، يجب على المتلاعبين بالروبوت معرفة موقع الأشياء التي يسعون إلى التلاعب بها؛ كما يجب على الروبوتات الملاحية أن تعرف مكان وجودها لتجد طريقها.

لابد من الإشارة إلى أنه ليست كل تصورات الروبوت عن التعريب ورسم الخرائط، فالروبوتات تدرك أيضًا درجة الحرارة والروائح والإشارات الصوتية وما إلى ذلك. كما يمكن تقدير العديد من هذه الكميات باستخدام متغيرات شبكات بايز الديناميكية، كل ما هو مطلوب لمثل هذه التقديرات هو توزيعات الاحتمالات الشرطية التي تميز تطور متغيرات الحالة بمرور الوقت، ونماذج المستشعر التي تصف علاقة القياسات بمتغيرات الحالة.

من الممكن أيضًا برمجة إنسان آلي كعامل رد الفعل، دون التفكير بوضوح في التوزيعات الاحتمالية على الولايات، هذا الاتجاه في علم الروبوتات هو بوضوح يتجه نحو التمثيلات مع دلالات محددة بدقة، تتفوق التقنيات الاحتمالية على الأساليب الأخرى في العديد من

المشاكل الإدراكية القوية مثل التعريب ورسم الخرائط، ومع ذلك، فإن التقنيات الإحصائية تكون في بعض الأحيان مرهقة للغاية، وقد تكون الحلول الأبسط فعالة في الممارسة، للمساعدة في تحديد النهج الذي يجب اتباعه، فإن تجربة العمل مع روبوتات حقيقية حقيقية هي أفضل معلم لديك.

التعلم الآلي وإدراك الروبوت:

يلعب التعلم الآلي دورًا مهمًا في إدراك الإنسان الآلي، وهذا هو الحال بشكل خاص عندما لا يكون أفضل تمثيل داخلي معروفً، يتمثل أحد الأساليب الشائعة في تعيين تيارات الاستشعار ذات الأبعاد العالية في مسافات منخفضة الأبعاد باستخدام طرق تعلم آلية غير خاضعة للإشراف، ويسمى هذا النهج التضمين منخفض الأبعاد، حيث يجعل التعلم الآلي من الممكن تعلم نماذج المستشعرات والحركة من البيانات، بينما يكتشف في نفس الوقت تمثيلات داخلية مناسبة.

وتمكن تقنية تعلم الآلة الروبوتات من التكيف باستمرار مع التغييرات الواسعة في قياسات الإحساس، صوّر نفسك وأنت تسير في الفضاء المضاء بالشمس في غرفة مظلمة مضاءة بالنيون، ستجد من الواضح أن الأمور أكثر قتامة في الداخل، لكن تغيير مصدر الضوء يؤثر أيضًا على جميع الألوان، حيث يحتوي ضوء النيون على عنصر أقوى من الضوء الأخضر مقارنة بأشعة الشمس، ومع ذلك يبدو أننا لا نلاحظ التغيير إذا كنا نسير مع أشخاص إلى غرفة مضاءة بالنيون، فإننا لا نعتقد أن وجوههم أصبحت فجأة خضراء، ويتكيف تصورنا بسرعة مع ظروف الإضاءة الجديدة، ويتجاهل دماغنا الاختلافات.

تمكن تقنيات الإدراك المتكيف الروبوتات من التكيف مع هذه التغييرات، ويرد مثال واحد في الشكل التالي مأخوذ من مجال القيادة الذاتية:

هنا تتكيف مركبة أرضية غير مأهولة مع المصنف الخاص بها "السطح القابل للقيادة"، كيف يعمل هذا؟ يستخدم الروبوت الليزر لتوفير تصنيف لمنطقة صغيرة أمام الروبوت، عندما يتم العثور على هذه المنطقة مسطحة في مسح المدى الليزري، يتم استخدامها كمثال تدريب إيجابي لمفهوم "السطح القابل للقيادة"، ويتم بعد ذلك تدريب أسلوب خليط من غاوسين مشابه لخوارزمية EM في التعرف على معاملات اللون والملمس المحددة من رقعة العينة الصغيرة.

الصور في الشكل السابق هي نتيجة تطبيق هذا المصنف على الصورة الكاملة، هذه الطرق التي تجعل الروبوتات تجمع بيانات التدريب الخاصة بها (مع الملصقات!) تسمى ذاتية الإشراف عليها.

في هذه الحالة، يستخدم الروبوت التعلم الآلي للاستفادة من جهاز استشعار قصير المدى يعمل بشكل جيد لتصنيف التضاريس في جهاز استشعار يمكن أن يرى أبعد بكثير، ويتيح ذلك للإنسان أن يقود بسرعة أكبر، أو يتباطأ فقط عندما يقول نموذج المستشعر أن هناك تغييرا في التضاريس يحتاج إلى فحص أكثر دقة من قبل أجهزة الاستشعار قصيرة المدى.

خامسا: المنافذ والمفاعلات المشغلات

وهي المكونات التي تمكن الروبوت من اتخاذ إجراء، حيث يستخدمون الآليات الكامنة، مثل العضلات والمحركات، لأداء وظائف مختلفة، ولكن بشكل رئيس للتنقل والتلاعب.

ويشمل التحريك والتلاعب حقلين فرعيين رئيسيين من الروبوتات. يتعلق الأمر

الأول بالحركة (أي أرجل الروبوتات)، بينما يهتم الأمر الثاني بمعالجة الأشياء (أي أذرع إنسان آلي).

سادسا: أجهزة التحكم

وهي الأجهزة و/ أو البرامج التي تمكن الروبوت من أن يكون مستقلاً ؛ ومن هنا الأجهزة التي تتحكم في قراراتهم – أو عقولهم.

إذا كان البشر يسيطرون جزئياً أو كلياً على البشر، فإنهم ليسوا مستقلين.

التخطيط لحركات الربوتات:

للربوتات حركات مترابطة وحركات غير مترابطة يتم التخطيط لمسار كل نوع من الحركات بطرق مختلفة نتعرض لها فيما يلي:

(1) التخطيط لحركة الربوتات المترابطة:

تأتي جميع مداولات الروبوت لتقرر كيفية نقل المستجيبات، حيث تتمثل مشكلة الحركة من نقطة إلى نقطة في تسليم الروبوت أو مفعوله النهائي إلى موقع مستهدف محدد، هذا التحدي الأكبر هو مشكلة الحركة المتوافقة، التي يتحرك فيها الإنسان الآلي بينما يكون في اتصال جسدي مع عائق.

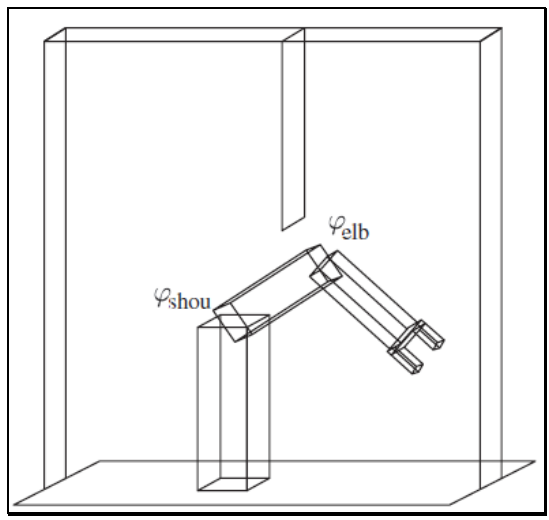
مثال للحركة المتوافقة هو مناور آلي يعمل على اللوالب في مصباح كهربائي، أو إنسان آلي يدفع علبة عبر سطح الطاولة، نبدأ بالبحث عن تمثيل مناسب يمكن من خلاله وصف مشاكل تخطيط الحركة وحلها، ولقد تبين أن مساحة التهيئة، أو مساحة حالات الروبوت المعرفة بالموقع والاتجاه وزوايا المفاصل هي مكان أفضل للعمل من الفضاء الثلاثي الأبعاد الأصلي.

تتمثل مشكلة تخطيط المسار في العثور على مسار من تكوين إلى آخر في مساحة التكوين.

إن المضاعفات التي أضافتها الروبوتات هي أن تخطيط المسار يتضمن مساحات مستمرة. فهناك طريقتان رئيسيتان المسار هما: تحلل الخلية وهيكلة العظام، وكل منها يقلل

من مشكلة تخطيط مسار مستمر إلى مشكلة منفصلة في البحث عن الرسم البياني.

سنبدأ بتمثيل بسيط لمشكلة بسيطة في حركة الروبوت، وهي النظر في ذراع الروبوت، كما هو مبين في الشكل التالي



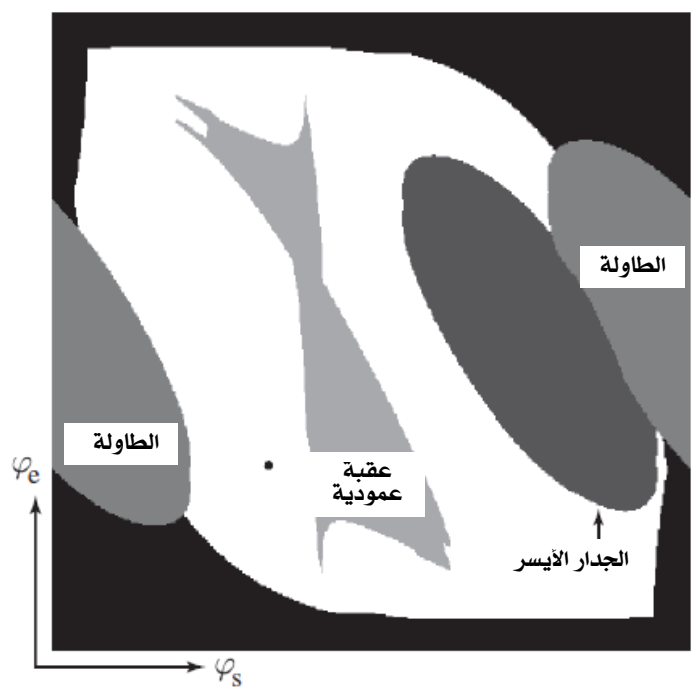
إن لديها اثنين من المفاصل التي تتحرك بشكل مستقل، إن تحريك المفاصل يغير الإحداثيات (x ،y) للمرفق والقبضة، و(لا يمكن أن يتحرك الذراع في اتجاه z)، وهذا يشير إلى أنه يمكن وصف تكوين الروبوت بواسطة إحداثيات رباعية الأبعاد: (xe ،ye) لموقع الكوع بالنسبة للبيئة و(xg ،yg) للموقع القابض.

من الواضح أن هذه الإحداثيات الأربعة تميز الحالة الكاملة للروبوت، وهي تشكل ما يعرف باسم تمثيل مساحة العمل، حيث يتم تحديد إحداثيات الروبوت في نفس نظام الإحداثيات مثل الأشياء التي يسعى إلى التلاعب بها (أو تجنبها).

تكون تمثيلات مساحة العمل مناسبة تمامًا لفحص التصادم، خاصةً إذا كان الروبوت وجميع الكائنات ممثلة بنماذج مضلعة بسيطة.

تكمن المشكلة في تمثيل مساحة العمل في أنه ليس بالإمكان تحقيق جميع إحداثيات مساحة العمل، حتى في غياب العوائق، ويرجع ذلك إلى وجود قيود ربط على مساحة إحداثيات مساحة العمل القابلة للتحقيق، على سبيل المثال، يكون موضع الكوع (ye، xe) وموضع القابض (yxg، xg) دائمًا مسافة ثابتة، لأنهما متصلتان بواسطة ساعد صلب، ويواجه مخطط الحركة الروبوتية الذي يتم تحديده عبر إحداثيات مساحة العمل التحدي المتمثل في توليد مسارات تلتزم بهذه القيود.

الشكل السابق هو تمثيل لمساحة العمل لذراع الروبوت مع صندوقين DOFs، ومساحة العمل هي عبارة عن صندوق مع عقبة مستوية تتدلى من السقف. أما في الشكل التالي يكون الفضاء هو التكوين لنفس الروبوت، هذه المناطق البيضاء فقط في المساحة هي تكوينات خالية من التصادمات، وتتطابق النقطة في هذا المخطط مع تكوين الروبوت الموضح على اليسار.



لأن مساحة الولاية مستمرة والقيود غير خطية، وتبين أنه من الأسهل التخطيط باستخدام تمثيل مساحة التكوين بدلاً من تمثيل حالة الروبوت بواسطة إحداثيات ديكارتية لعناصرها، فإننا نمثل الدولة عن طريق تكوين مفاصل الروبوت.

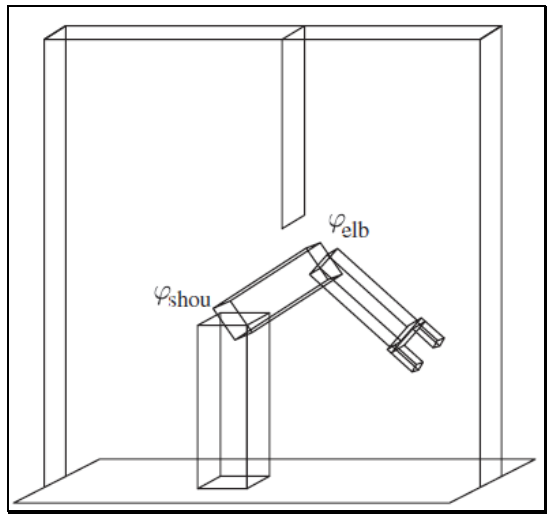
لدينا على سبيل المثال الروبوت يمتلك مفصلين، ومن ثم، يمكننا تمثيل حالته بزاويتي ands وfore لمفصل الكتف ومفصل الكوع، على التوالي. في غياب أي عوائق، يمكن لأي روبوت أن يأخذ أي قيمة في حيز التكوين بحرية، على وجه الخصوص، عند تخطيط مسار يمكن ببساطة توصيل التكوين الحالي والتكوين المستهدف بخط مستقيم.

في اتباع هذا المسار، يقوم الروبوت بتحريك مفاصله بسرعة ثابتة، إلى أن يتم الوصول إلى موقع مستهدف. لسوء الحظ، فإن مساحات التهيئة لها مشكلاتها الخاصة، عادة ما يتم التعبير عن مهمة الروبوت في إحداثيات مساحة العمل، وليس في إحداثيات مساحة التكوين.

هذا يثير سؤالا عن كيفية رسم خريطة بين إحداثيات مساحة العمل ومساحة التكوين. وتعد إحداثيات تكوين تشكيل الفراغات في إحداثيات مساحة العمل بسيطة: فهي تتضمن سلسلة من التحولات المنسقة المباشرة. هذه التحولات خطية للمفاصل المنشورية والمثلثية للمفاصل الثائرة.

وتعرف هذه السلسلة من التحول بالإحداثيات الحركية، وتُعرف المشكلة العكسية الخاصة بحساب تكوين روبوت محدد موقعه المستجيب في إحداثيات مساحة العمل باسم الحركية العكسية، كما يعد حساب الميكانيكا العكسية صعبًا، خاصة بالنسبة إلى الروبوتات التي تحتوي على العديد من الدبابيس. على وجه الخصوص، نادراً ما يكون الحل فريدًا.

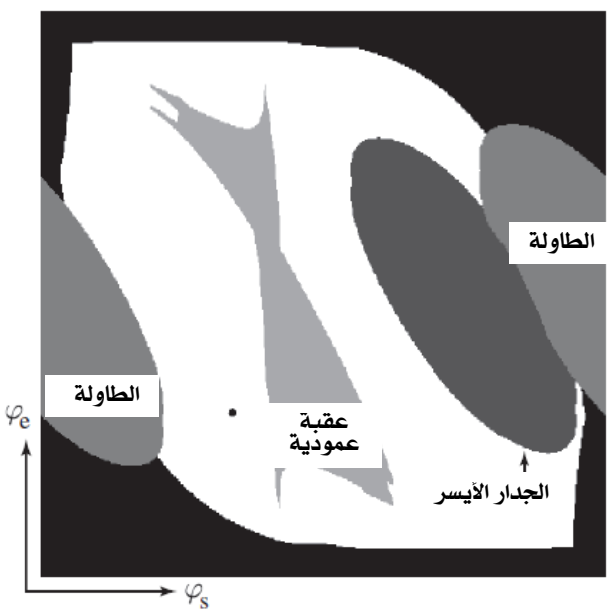
يوضح الشكل التالي إحدى تكوينين محتملين يضعان القابض في نفس الموقع. (سيحتوي التكوين الآخر على الكوع تحت الكتف)



بشكل عام، هذا الذراع الروبوتية ذات الرابطين تحتوي على ما بين صفر واثنين من الحلول الحركية العكسية لأي مجموعة من إحداثيات مساحة العمل، وتتمتع معظم الروبوتات الصناعية بدرجات كافية من الحرية لإيجاد العديد من الحلول لمشاكل الحركة بشكل لا نهائي، لنرى كيف يمكن تحقيق ذلك، تخيل ببساطة أننا أضفنا مفصلًا ثالثًا إلى الروبوت الخاص بنا، وهو محور يتوازى محور دورانه مع المفاصل الموجودة، وفي مثل هذه الحالة يمكننا الحفاظ على الموقع (ولكن ليس الاتجاه!) من القابض الثابتة ولا تزال تدور بحرية مفاصله الداخلية، لمعظم تكوينات الروبوت مع عدد قليل من المفاصل (كم؟) يمكننا تحقيق نفس التأثير مع الحفاظ على اتجاه ثابت القابض كذلك.

لقد رأينا بالفعل مثالاً على ذلك في "تجربة" وضع يدك على المكتب وتحريك مرفقك، إن القيد الحركي لموضع اليد غير كافٍ لتحديد تكوين المرفق. بعبارة أخرى، تمتلك الحركة الحركية المعكوسة لمجموعتك في الكتف والذراع عددًا لا نهائيًا من الحلول، المشكلة الثانية مع تمثيلات مساحة التكوين تنشأ من خلايا التوليد التي قد توجد في مساحة عمل الروبوت.

ويوضح مثالنا في الشكل السابق العديد من هذه العقبات، بما في ذلك عائق معلق بشكل مباشر يبرز في وسط مساحة عمل الروبوت. في مجال العمل، تأخذ هذه العوائق أشكالاً هندسية بسيطة خاصة في معظم الكتب الدراسية للروبوتات، التي تميل إلى التركيز على العقبات متعددة الأضلاع.



ولكن كيف تبدو في مساحة التكوين؟ فيوضح الشكل التالي مساحة التكوين الخاصة بنا في الروبوت، تحت تكوين العوائق المحددة المبينة في الشكل السابق كما يمكن أن تتحلل مساحة التكوين إلى منطقتين فرعيتين: مساحة جميع التكوينات التي يمكن أن يحققها الروبوت، وتسمى عادة المساحة الحرة، ومساحة التكوينات غير القابلة للتحقيق، التي يطلق عليها مساحة مشغولة.

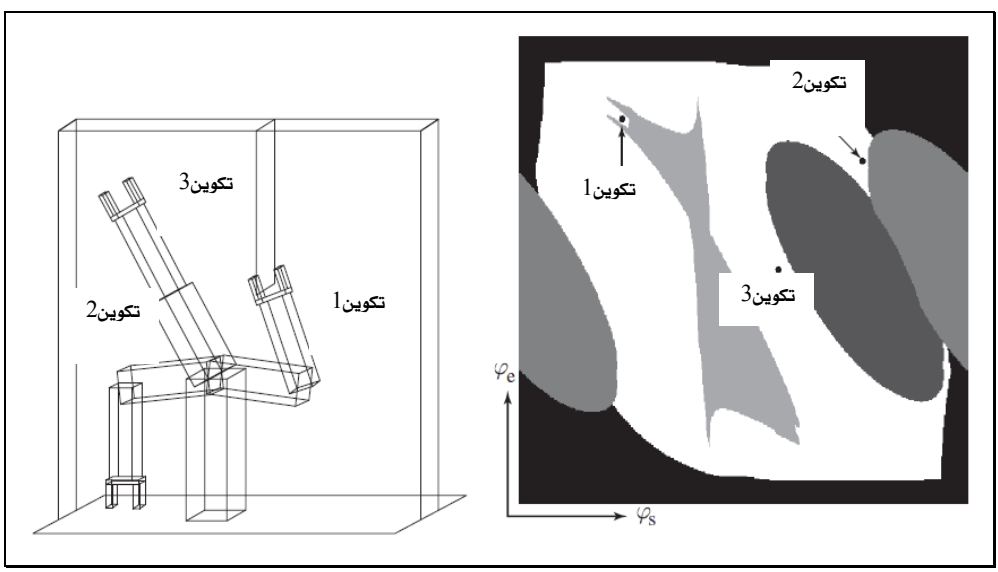
المساحة البيضاء في الشكل السابق تقابل المساحة الحرة، وجميع المناطق الأ==خرى تتطابق مع المساحة المشغولة، فتتوافق التباينات المختلفة للفضاء المشغول مع الأجسام المختلفة في مساحة عمل الروبوت؛ حيث تتطابق المنطقة السوداء المحيطة بالمساحة الحرة بالكامل مع التكوينات التي يتصادم فيها الروبوت مع نفسه، ومن السهل أن نرى أن القيم المتطرفة في الكتف أو زوايا المرفق تسبب مثل هذا الانتهاك، كما تتوافق المنطقتان البيضاويتان على الجانبين من الروبوت مع الطاولة التي يتم تركيب الروبوت عليها، كما أن المنطقة الثالثة البيضاوية تقابل الجدار الأيسر.

وأخيرًا، فإن أهم عنصر في مساحة التهيئة هو العائق الرأسي الذي يتدلى من السقف

ويعرقل حركة الروبوت، هذا الكائن له شكل مضحك في مساحة التكوين: فهو غير خطي للغاية وفي الأماكن حتى المقعرة.

مع القليل من الخيال، سيتعرف القارئ على شكل القابض في الطرف الأيسر العلوي، نحن نشجع القارئ على التوقف للحظة ودراسة هذا الرسم البياني، شكل هذه العقبة ليست واضحة على الإطلاق! تشير النقطة داخل الشكل السابق إلى تكوين الروبوت، كما هو موضح في الشكل الأسبق.

كما يوضح الشكل التالي ثلاثة تكوينات إضافية، سواء في مساحة العمل أو في مساحة التكوين، ففي التوصيف conf-1، يحبس القابض العائق الرأسي حتى إذا كانت مساحة العمل في الروبوت ممثلة بمضلعات مسطحة، يمكن أن يكون شكل المساحة الحرة معقدًا للغاية، وفي الممارسة العملية، لذلك، عادةً ما يبحث المرء عن مساحة تكوين بدلاً من بنائه بشكل صريح، كما يمكن للمخطط أن يكوِّن توصيفًا ثم يختبر لمعرفة ما إذا كان في الفضاء الحر من خلال تطبيق م تكوين1 روبوت ثم التحقق من وجود تصادمات في إحداثيات مساحة العمل.

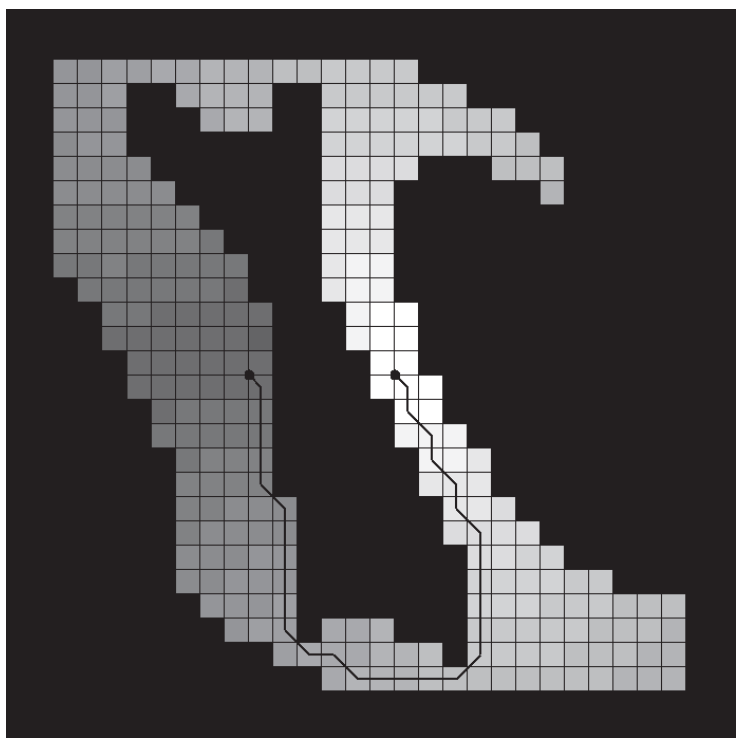


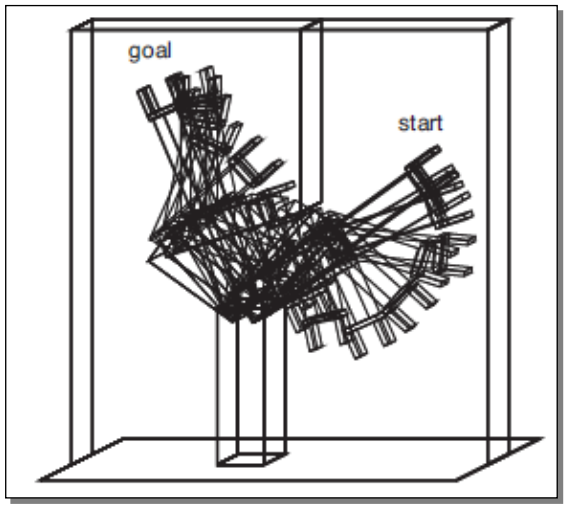
وفيما يلي عرض لطرق تخطيط المسار للحركات المترابطة:

أولا: طرق التحلل الخلوي:

يستخدم النهج الأول لتخطيط المسار "انحلال الخلية"، أي أنه يحلل المساحة الحرة إلى عدد محدود من المناطق المتجاورة، تتمتع هذه المناطق بخاصية هامة يمكن حل مشكلة تخطيط المسار داخل منطقة واحدة من خلال وسائل بسيطة (على سبيل المثال، التحرك على طول خط مستقيم). ثم تصبح مشكلة تخطيط المسار مشكلة منفصلة في البحث عن الرسوم البيانية.

يتألف أبسط تحليل خلوي من شبكة منتظمة التباعد، ويعرض الشكل التالي تحليلاً مربعاً للشبكة للمساحة ومسار حل مثالي لحجم الشبكة، ويشير التظليل الرمادي إلى قيمة كل خلية شبكة في الفضاء الحر، أي تكلفة أقصر مسار من تلك الخلية إلى الهدف.





كما يبين الشكل التالي مسار مساحة العمل المطابق للذراع.

بالطبع، يمكننا أيضًا استخدام خوارزمية A للبحث عن أقصر مسار، ويمتلك هذا التحلل ميزة أنه سهل التطبيق للغاية، ولكنه يعاني أيضًا من ثلاثة قيود:

- **أولاً**: إنه قابل للتطبيق فقط لمساحات التكوين ذات الأبعاد المنخفضة، لأن عدد خلايا الشبكة يزداد أضعافاً مضاعفة مع عدد الأبعاد.
- **ثانياً**: هناك مشكلة ما يجب فعلها مع الخلايا "المختلطة"، أي ليس داخل الفضاء الحر ولا داخل الفضاء المحتل بالكامل. قد لا يكون مسار الحل الذي يتضمن مثل هذه الخلية حلاً حقيقياً، لأنه قد لا توجد طريقة لعبور الخلية في الاتجاه المطلوب في خط مستقيم، هذا من شأنه أن يجعل مخطط المسار غير سليم.

من ناحية أخرى، إذا كنا نُصرّ على أنه لا يمكن استخدام سوى الخلايا الحرة تمامًا، فسيكون المخطط غير كامل، لأنه قد تكون الحالة هي أن المسارات الوحيدة إلى الهدف تمر عبر الخلايا المختلطة، خاصة إذا كان حجم الخلية مشابهاً للممرات والموافقات في الفضاء.

- **ثالثًا**: لن يكون أي مسار من خلال مساحة الدولة المتقاربة سلسًا، من الصعب بشكل عام ضمان وجود حل سلس بالقرب من المسار المنفصل. لذلك، قد لا يتمكن الروبوت من تنفيذ عملية التفكيك التي تم العثور عليها من خلال هذا التحلل، فيمكن تحسين طرق تحلل الخلايا بعدد من الطرق، للتخفيف من بعض هذه المشاكل، إن النهج الأول يسمح لمزيد من التقسيم للخلايا المختلطة، ربما خلايا نصف الحجم الأصلي.

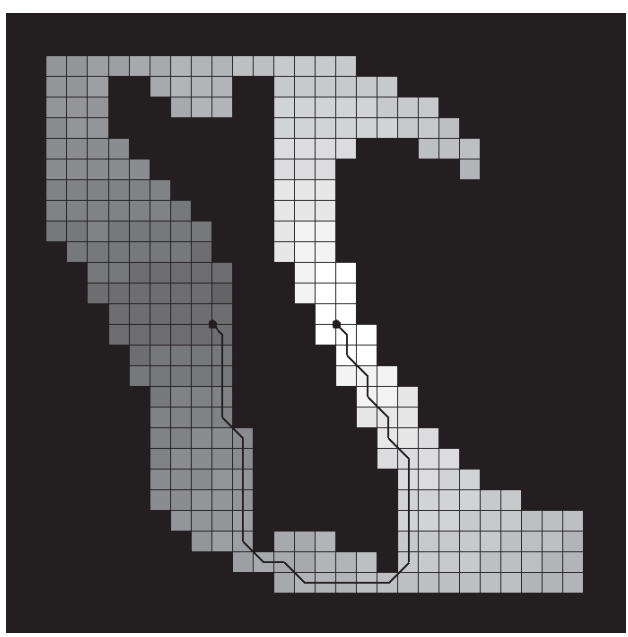
يمكن أن يستمر هذا بشكل متكرر حتى يتم العثور على مسار يقع بالكامل داخل

الخلايا الحرة. (وبالطبع، لا تعمل الطريقة إلا إذا كانت هناك طريقة للتمييز إذا كانت الخلية المعينة خلية مختلطة، وهو أمر سهل فقط إذا كانت حدود مساحة التكوين تحتوي على أوصاف رياضية بسيطة نسبيًا)

هذه الطريقة كاملة بشرط أن يكون هناك ممر أصغر من خلالها يجب أن يمر الحل، على الرغم من أنها تركز على الجهد الحسابي على المناطق الصعبة داخل حيز التكوين، إلا أنها لا تزال في نطاق جيد للمشاكل عالية الأبعاد لأن كل تقسيم متكرر لخلية يخلق خلايا أصغر من d2.

والطريقة الثانية للحصول على خوارزمية كاملة هي الإصرار على تحلل الخلية الدقيق للفضاء الحر، فيجب أن تسمح هذه الطريقة بتكوين الخلايا بشكل غير منتظم حيث تلبي حدود المساحة الحرة، ولكن يجب أن تظل الأشكال "بسيطة" بمعنى أنه يجب أن يكون من السهل حساب عبور أي خلية حرة، تتطلب هذه التقنية بعض الأفكار الهندسية المتطورة، لذلك لن نتابعها هنا.

عند فحص مسار الحل الموضح في الشكل التالي:



يمكننا أن نرى صعوبة إضافية يجب حلها، فيحتوي المسار على زوايا حادة تعسفية؛ إن الروبوت الذي يتحرك في أي سرعة محدودة لا يمكنه تنفيذ مثل هذا المسار، ويتم حل هذه المشكلة عن طريق تخزين قيم مستمرة معينة لكل خلية شبكة، خذ في الاعتبار خوارزمية تخزن، لكل خلية شبكة، تم توسيع الحالة الدقيقة والمستمرة التي تم تحقيقها مع الخلية لأول مرة في البحث، لنفترض كذلك أنه عند نشر المعلومات إلى خلايا الشبكة القريبة، فإننا نستخدم هذه الحالة المستمرة كأساس، ونطبق نموذج حركة الروبوت المستمر للقفز إلى الخلايا المجاورة، وعند القيام بذلك، يمكننا الآن ضمان أن المسار الناتج يكون سلسًا ويمكن أن يتم تنفيذه بالفعل بواسطة الروبوت، حيث إن خوارزمية واحدة تقوم بتنفيذ هذا هي A * مختلطة.

وظائف التكلفة المعدلة:

لاحظ أنه في الشكل السابق يصبح المسار قريبًا جدًا من العائق، حيث إن أي شخص قاد سيارة يعرف أن مكان وقوف السيارات مع ملليمتر واحد من الإزالة على أي من الجانبين ليس في الحقيقة مكان لوقوف السيارات على الإطلاق.

لنفس السبب، فإننا نفضل مسارات الحل القوية فيما يتعلق بأخطاء الحركة الصغيرة، ويمكن حل هذه المشكلة عن طريق إدخال حقل محتمل، هذا الحقل المحتمل هو دالة محددة على مساحة الولاية، والتي تنمو قيمتها مع المسافة إلى أقرب عقبة.

ويوضح الشكل التالي مثل هذا الحقل المحتمل كلما كانت حالة التكوين أكثر قتامة، كلما كان أقرب إلى العائق.

يمكن استخدام الحقل المحتمل كمصطلح تكلفة إضافي في حساب أقصر المسارات، هذا يدفع مقايضة مثيرة للاهتمام. من ناحية، يسعى الروبوت إلى تقليل طول

المسار إلى الهدف، ومن ناحية أخرى، فإنه يحاول الابتعاد عن العقبات من خلال التقليل من الوظيفة المحتملة، مع توازن الوزن المناسب بين الهدفين، قد يبدو المسار الناتج كالذي يظهر في الشكل التالي.

يعرض هذا الشكل أيضًا دالة القيمة المشتقة من دالة التكلفة المجمعة، ويتم حسابها مرة أخرى حسب تكرار القيمة.

ومن الواضح أن المسار الناتج أطول، ولكنه أكثر أمانًا أيضًا.

هناك العديد من الطرق الأخرى لتعديل وظيفة التكلفة. على سبيل المثال، قد يكون من المرغوب فيه تسهيل معلمات التحكم بمرور الوقت، أو عند قيادة السيارة، يكون المسار السلس أفضل من مسار متعرج.

بشكل عام، ليس من السهل استيعاب مثل هذه القيود ذات المستوى الأعلى في عملية التخطيط، ما لم نجعل أحدث قيادة جزءًا من الدولة.

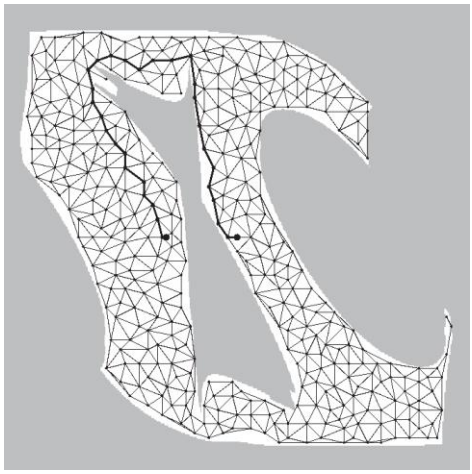
ومع ذلك، غالباً ما يكون من السهل تسهيل المسار الناتج بعد التخطيط باستخدام أساليب متدرجة متدرجة.

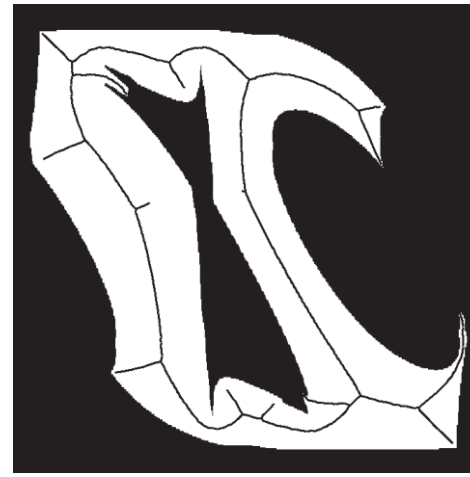
ويعد هذا تمهيد ما بعد التخطيط أمر ضروري في العديد من التطبيقات في العالم الحقيقي.

ثانيا: طرق هيكلة العظام:

وتستند النهج الثاني لخوارزميات تخطيط المسار إلى فكرة الهيكل العظمي، حيث تعمل هذه الخوارزميات على تقليل المساحة الخالية من الروبوت إلى تمثيل أحادي البعد، حيث تكون مشكلة التخطيط أسهل.

يسمى هذا التمثيل ذو الأبعاد الضعيفة هيكلًا كبيرًا لمساحة التكوين. يوضح الشكلين التاليين مثالاً على الهيكل العظمي:





وهو الرسم البياني voronoi للفضاء الحر – وهو عبارة عن مجموعة من النقاط التي تكون على مسافة واحدة من عقدين أو أكثر.

وللقيام بتخطيط المسار باستخدام رسم بياني Voronoi، يقوم الروبوت بالتالي:

- أولاً، تغيير تكوينه الحالي إلى نقطة على الرسم البياني Voronoi، ومن السهل إظهار أن هذا يمكن تحقيقه دائمًا بحركة خط مستقيم في مساحة التكوين.
- ثانيا، يتبع الروبوت الرسم البياني Voronoi حتى يصل إلى أقرب نقطة إلى تكوين الهدف.
- وأخيرا، يترك الروبوت الرسم البياني Voronoi وينتقل إلى الهدف. مرة أخرى، تتضمن هذه الخطوة النهائية حركة خط مستقيم في مساحة التكوين.

بهذه الطريقة، يتم تقليل المشكلة الأصلية لتخطيط المسار للعثور على مسار على الرسم البياني Voronoi، والذي يكون عادةً أحادي البعد (ما عدا في بعض الحالات غير العامة) ولديه نقاط عديدة بشكل محدود حيث تتقاطع ثلاثة أو أكثر من المنحنيات أحادية البعد. وبالتالي، يتم العثور عليها.

(2) التخطيط للحركات غير مترابطة:

لا يعالج أي من خوارزميات تخطيط الحركة الروبوتية التي نوقشت حتى الآن بصفة رئيسية مشاكل الروبوتات مثل عدم اليقين في مجال الروبوتات، حيث ينشأ عدم اليقين من الملاحظة الجزئية للبيئة ومن الآثار العشوائية لإجراءات الروبوت،و يمكن أن تنشأ الأخطاء أيضًا من استخدام خوارزميات التقريب مثل ترشيح الجسيمات، والتي لا توفر للروبوت حالة اعتقاد دقيقة حتى إذا كانت الطبيعة العشوائية للبيئة قد تم تصميمها بشكل مثالي.

وتستخدم معظم روبوتات اليوم خوارزميات حتمية لاتخاذ القرار، مثل خوارزميات تخطيط المسار التي عرضناها في الجزء السابق.

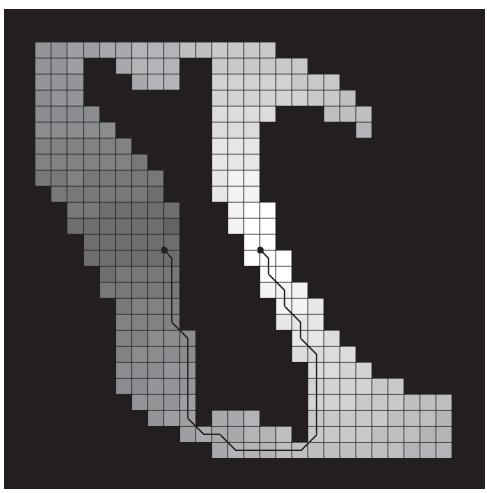
وللقيام بذلك، من الشائع استخراج الحالة الأكثر احتمالاً من توزيع الاحتمالات الناتج عن خوارزمية تقدير الحالة، ميزة هذا النهج هو حسابية بحتة، حيث إن مسارات التخطيط من خلال مساحة التكوين هي بالفعل مشكلة صعبة؛ وستكون أسوأ إذا اضطررنا للعمل مع توزيع احتمالي كامل، ويتجاهل عدم اليقين بهذه الطريقة عندما تكون حالة عدم اليقين صغيرة.

في الواقع، عندما يتغير نموذج البيئة بمرور الوقت كنتيجة لدمج قياسات المستشعر، فإن العديد من برامج الروبوت تعمل على تخطيط مسارات عبر الإنترنت أثناء تنفيذ الخطة، وهذا هو أسلوب إعادة البرمجة عبر الإنترنت.

لكن لسوء الحظ، إن تجاهل عدم اليقين لا يعمل دائمًا، في بعض المشاكل إن عدم اليقين في الروبوت ببساطة مشكلة كبيرة للغاية: كيف يمكننا استخدام مخطط مسار محدد للتحكم في روبوت متحرك لا يوجد لديه دليل على مكانه؟ بشكل عام، إذا لم تكن الحالة الحقيقية للروبوت هي الحالة المحددة بواسطة قاعدة الحد الأقصى للاحتمالية، فإن عنصر التحكم الناتج سيكون دون المستوى الأمثل. اعتمادا على حجم الخطأ هذا يمكن أن يؤدي إلى جميع أنواع الآثار غير المرغوب فيها، مثل الاصطدامات مع العقبات.

اعتمد مجال الروبوتات على مجموعة من التقنيات لاستيعاب عدم اليقين، بعضها مشتق من الخوارزميات المستخدمة لاتخاذ القرار في ظل عدم اليقين، إذا كان الروبوت يواجه عدم اليقين فقط في حالة انتقاله، ولكن حالته يمكن ملاحظتها بالكامل، حيث يتم تشكيل المشكلة بشكل أفضل كعملية قرار ماركوف (MDP).

إن حل MDP هو سياسة مثالية، والتي تخبر الروبوت ما يجب القيام به في كل حالة ممكنة. وبهذه الطريقة، يمكنه التعامل مع جميع أنواع أخطاء الحركة، في حين أن حل المسار الواحد سيكون أقل قوة بكثير.



في الروبوتات، تسمى السياسات بوظائف الملاحة، حيث يمكن تحويل وظيفة القيمة الموضحة في الشكل التالي إلى وظيفة الملاحة هذه ببساطة عن طريق اتباع التدرج.

لكن الملاحظة الجزئية تجعل المشكلة أصعب بكثير، حيث أن مشكلة التحكم في الروبوت الناتجة هي MDP يمكن ملاحظتها جزئيًا، أو POMDP. في مثل هذه الحالات، يحتفظ الروبوت بحالة اعتقاد داخلية.

إن الحل لـ POMDP هو سياسة محددة على حالة الاعتقاد للروبوت. بعبارة أخرى، فإن المدخلات في السياسة هي توزيع احتمالية كاملة، وهذا يمكّن الروبوت من اتخاذ قراره ليس فقط على ما يعرفه، ولكن أيضًا على ما لا يعرفه، على سبيل المثال، إذا كان غير مؤكد بشأن متغير حالة حرج، فيمكنه استدعاء إجراء تجميع المعلومات بعقلانية. هذا مستحيل في إطار MDP، حيث إن أنظمة التوزيع الدنيا تفترض إمكانية المراقبة الكاملة.

ولسوء الحظ، فإن التقنيات التي تحل مشكلات POMDP لا يمكن تطبيقها على الروبوتات بالضبط، ولا توجد تقنيات معروفة لمساحات مستمرة عالية الأبعاد، ينتج عن

إزالة الحبيبات POMDPs التي تكون كبيرة جدًا في التعامل معها، أحد العلاجات هو جعل تقليل عدم اليقين هدفا سيطريا. على سبيل المثال، يتطلب الكشف عن الملاحة الساحلية أن يبقى الروبوت بالقرب من المعالم المعروفة لتقليل عدم اليقين، حيث إن نهجا آخر ينطبق على المتغيرات من طريقة التخطيط خارطة الطريق الاحتمالية لتمثيل مساحة المعتقد، تميل مثل هذه الأساليب إلى النطاق بشكل أفضل إلى POMDPs منفصلة كبيرة.

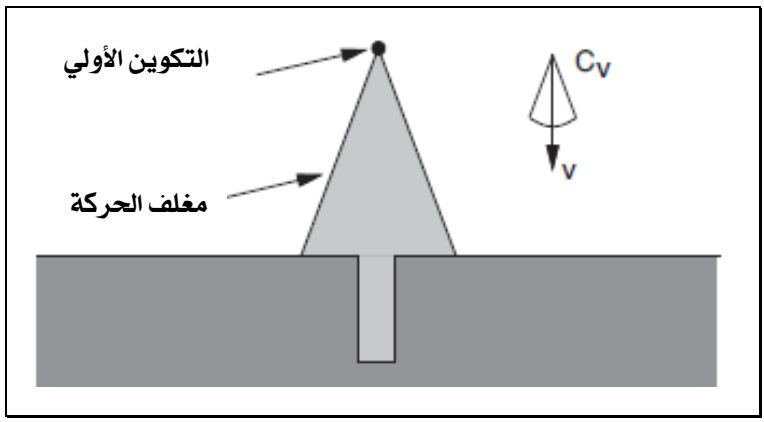
طرق قوية:

يمكن أيضًا معالجة عدم اليقين باستخدام ما يسمى أساليب التحكم القوية بدلاً من الأساليب الاحتمالية، فالطريقة القوية هي الطريقة التي تفترض مقدارًا محدودًا من اليقين في كل جانب من جوانب المشكلة، ولكنها لا تعيّن الاحتمالات على القيم ضمن الفترة المسموح بها، والحل القوي هو الحل الذي يعمل بغض النظر عن القيم الفعلية، بشرط أن تكون ضمن الفاصل الزمني المفترض.

إن الشكل المتطرف للأسلوب القوي هو أسلوب التخطيط الصارم للتضمين المعطى، فهو ينتج خططًا تعمل بدون معلومات حكومية على الإطلاق.

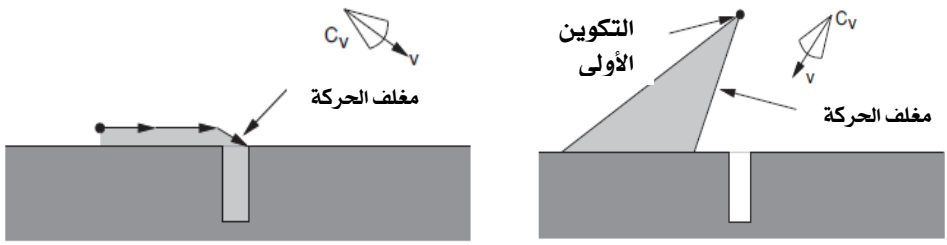
هنا، ننظر إلى طريقة قوية تستخدم في تخطيط الحركة الدقيقة (أو FMP) في مهام التجميع الروبوتية، ويتضمن تخطيط الحركة الدقيقة تحريك ذراع الروبوت على مقربة شديدة من كائن البيئة الثابتة، وتكمن الصعوبة الرئيسية مع تخطيط الحركة الدقيقة في أن الاقتراحات المطلوبة والميزات ذات الصلة للبيئة صغيرة للغاية. في مثل هذه المقاييس الصغيرة، لا يستطيع الروبوت القياس أو التحكم في موقعه بدقة وقد يكون غير مؤكد أيضًا على شكل البيئة نفسها؛ سنفترض أن جميع أوجه عدم اليقين هذه مقيدة، فعادةً ما تكون حلول مشاكل FMP خططًا أو سياسات مشروطة تستخدم ملاحظات المستشعر أثناء التنفيذ وتضمن العمل في جميع الحالات بما يتفق مع حدود عدم اليقين المفترضة، وتتألف خطة الحركة الدقيقة من سلسلة من الاقتراحات ذات الحراسة، كما تتألف كل حركة خاضعة للحراسة من أمر حركة وحالة إنهاء، وهي دالة على قيم جهاز الاستشعار

في الروبوت، وتعود إلى true للإشارة إلى نهاية الحركة التي تخضع للحراسة، وتكون أوامر الحركة عادة حركات متوافقة تسمح للمرسل أن ينزلق إذا تسبب أمر الحركة في الاصطدام مع عائق. على سبيل المثال، يوضح الشكل التالي مساحة تكوين ثنائية الأبعاد مع فتحة رأسية ضيقة.



يمكن أن تكون مساحة التكوين لإدخال ربط مستطيل في حفرة أو مفتاح سيارة في الإشعال، في حين أن أوامر الحركة هي سرعات ثابتة، وشروط الإنهاء هي الاتصال مع السطح؛ لتوضيح عدم اليقين في السيطرة، فلنفترض أنه بدلاً من التحرك في الاتجاه الموجه، تكمن الحركة الفعلية للروبوت في المخروط Cv حوله، ويوضح الشكل ماذا سيحدث إذا أمرنا بسرعة من أسفل التكوين الأولي. فبسبب عدم اليقين في السرعة، يمكن أن يتحرك الروبوت في أي مكان في المغلف المخروطي، ومن المحتمل أن يدخل الحفرة، ولكن من المرجح أن يهبط إلى جانب واحد منه؛ لأن الروبوت لن يعرف بعد ذلك أي جانب من الحفرة التي كان عليها، فإنه لا يعرف أي طريقة للتحرك.

تظهر الاستراتيجية الأكثر منطقية في الشكلين التاليين:



ففي الشكل الأول منهما يتحرك الروبوت بشكل متعمد إلى جانب واحد من الحفرة، بينما يظهر أمر الحركة في الشكل، واختبار الإنهاء هو الاتصال بأي سطح.

أما في الشكل الثاني منهما فيتم إعطاء أمر الحركة الذي يتسبب في انزلاق الروبوت على طول السطح وإلى الفتحة؛ لأن جميع السرعات الممكنة في مظروف الحركة هي إلى اليمين، وسوف ينزلق الروبوت إلى اليمين عندما يكون على اتصال بسطح أفقي، ثم ينزلق على الحافة العمودية اليمنى للفتحة عندما تلمسها، لأن كل السرعات الممكنة تكون منخفضة بالنسبة للسطح الرأسي، وسوف تستمر الحركة حتى تصل إلى قاع الحفرة، لأن هذا هو شرط انتهائها.

وعلى الرغم من عدم اليقين في التحكم، فإن جميع المسارات الممكنة للروبوت تنتهي في اتصال مع قاع الحفرة، وهذا يعني، أنه ما لم تتسبب مخالفات السطح في أن يلتصق الروبوت في مكان واحد، وكما قد يتخيل المرء، فإن مشكلة بناء خطط الحركة الجيدة ليست بسيطة.

في الواقع، إنها صفقة أكثر صعوبة من التخطيط بحركات دقيقة، يمكن للمرء إما اختيار عدد ثابت من القيم المنفصلة لكل حركة أو استخدام هندسة البيئة لاختيار الاتجاهات التي تعطي سلوكًا مختلفًا نوعيًا، فيأخذ مخطط الحركات الدقيقة مدخلاً إلى وصف مساحة التهيئة، وزاوية مخروط عدم اليقين للسرعة، والمواصفة، وما هو الاستشعار الممكن لإنهاء (الاتصال السطحي في هذه الحالة)، فيجب أن ينتج خطة أو سياسة مشروطة متعددة الخطوات يضمن نجاحها، وإذا وجدت مثل هذه الخطة، فيفترض مثالنا

أن المخطط يحتوي على نموذج دقيق للبيئة، ولكن من الممكن السماح بحدوث خطأ محدد في هذا النموذج على النحو التالي، إذا كان من الممكن وصف الخطأ من حيث المعلمات، فيمكن إضافة هذه المعلمات كدرجات الحرية إلى مساحة التكوين.

في المثال الأخير، إذا كان عمق وعرض الثقب غير مؤكد، فيمكننا إضافتها كدرجتين من الحرية إلى مساحة التكوين، فقد يكون من المستحيل تحريك الروبوت في هذه الاتجاهات في مساحة التكوين أو الإحساس بموقعه مباشرة. ولكن يمكن إدراج هذين التقيدين عند وصف هذه المشكلة بأنها مشكلة FMP عن طريق تحديد شكوك التحكم والاستشعار بشكل مناسب. وهذا يعطي مشكلة تخطيط رباعية الأبعاد معقدة، ولكن يمكن تطبيق نفس أساليب التخطيط بالضبط، ويمكنك أن تلاحظ أنه خلافاً للطرق النظرية، فإن هذا النوع من النهج القوي ينتج عنه خطط مصممة لتحقيق أسوأ النتائج، بدلاً من تعظيم الجودة المتوقعة للخطة، وتعتبر خطط الحالة الأسوأ هي الأمثل في مفهوم القرار النظري، فقط إذا كان الفشل أثناء التنفيذ أسوأ بكثير من أي من التكاليف الأخرى التي ينطوي عليها التنفيذ.

حركة الربوتات:

لقد تحدثنا حتى الآن عن كيفية تخطيط المسارات، ولكن ليس حول كيفية التحرك، فتفترض خططنا، ولا سيما تلك التي ينتجها مخططو المسار الحتمية، أن الروبوت يمكنه ببساطة اتباع أي مسار تنتجه الخوارزمية.

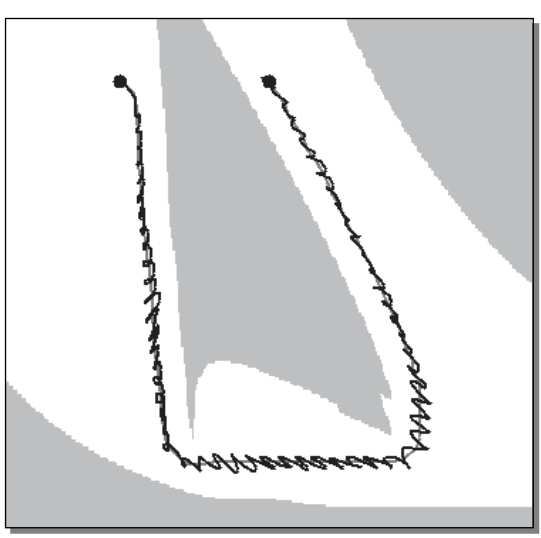
في الواقع، ليس هذا هو الحال، إن الروبوتات لديها الجمود ولا يمكن تنفيذ مسارات تعسفية إلا في سرعات بطيئة بشكل تعسفي.

وفي معظم الحالات، يقوم الروبوت بممارسة القوى بدلاً من تحديد المواضع، وفي هذا الجزء سوف نناقش طرق حساب هذه القوى.

الديناميكيات والتحكم:

من حيث المبدأ، كان بإمكاننا اختيار تخطيط حركة الروبوت باستخدام نماذج ديناميكية، بدلاً من نماذجنا الحركية، مثل هذه المنهجية ستؤدي إلى أداء روبوت متفوق، إذا استطعنا توليد الخطط. ومع ذلك، فإن الحالة الديناميكية لديها بعد أعلى من المساحة الحركية، ومشكلة الأبعاد تجعل العديد من خوارزميات تخطيط الحركة غير قابلة للتطبيق للجميع ولكن أكثر الروبوتات البسيطة، لهذا السبب، تعتمد على نظام الروبوت العملي في كثير من الأحيان على مخططي مسار حركي أبسط، فهناك تقنية شائعة للتعويض عن أوجه القصور في الخطط الحركية لاستخدام آلية منفصلة، وحدة تحكم، من أجل الحفاظ على الروبوت على المسار الصحيح.

وحدات التحكم هي تقنيات لتوليد عناصر تحكم الروبوت في الوقت الحقيقي باستخدام التغذية المرتدة من البيئة، وذلك لتحقيق هدف السيطرة، إذا كان الهدف هو الاحتفاظ بالروبوت على مسار مخطط مسبقًا، فغالبًا ما يشار إليه على أنه وحدة تحكم مرجعية ويسمى المسار مسارًا مرجعيًا، وتُعرف وحدات التحكم التي تعمل على تحسين دالة التكلفة العالمية بوحدات التحكم المثلى، تعد هذه السياسات المثلى لبرامج MDP المستمرة، في الواقع، هي وحدات التحكم المثالية. لكن في الظاهر، تبدو مشكلة الاحتفاظ بروبوت على مسار محدد سلفًا بسيطة نسبيًا، لكن في الممارسة العملية، حتى هذه المشكلة البسيطة تبدو لها مزالقها.



يوضح الشكل التالي ما يمكن أن يحدث بشكل خاطئ، فيظهر مسار الروبوت الذي يحاول اتباع مسار kinematic.

عندما يحدث انحراف، سواء بسبب الضوضاء أو القيود على القوى التي يمكن للروبوت تطبيقها، فإنه

الروبوت يوفر قوة معارضة يتناسب حجمها مع هذا الانحراف. بشكل حدسي، قد يبدو هذا معقولاً، حيث يجب تعويض الانحرافات بواسطة قوة مضادة للحفاظ على الروبوت على الطريق الصحيح. ومع ذلك، كما يوضح الشكل قد يتسبب جهاز التحكم لدينا في اهتزاز الروبوت بشكل عنيف، إن الاهتزاز هذا هو نتيجة لقصور طبيعي في ذراع الروبوت، فبمجرد دفعه مرة أخرى إلى موقعه المرجعي، يقوم الروبوت بعد ذلك بالارتفاع، مما يؤدي إلى خطأ متماثل مع علامة معاكسة، وقد يستمر هذا التجاوز على طول مسار كامل، وحركة الروبوت الناتجة بعيدة عن المرغوب فيه، لكن قبل أن نتمكن من تحديد وحدة تحكم أفضل.

التحكم في المجال المحتمل:

قدمنا المجالات المحتملة كوظيفة تكلفة إضافية في تخطيط حركة الروبوت، ولكن يمكن استخدامها أيضًا لتوليد حركة الروبوت مباشرةً، والاستغناء عن مرحلة تخطيط المسار تمامًا. ولتحقيق ذلك، يتعين علينا تحديد قوة جذابة تسحب الروبوت نحو تكوين هدفه وحقل محتمل طارد يدفع الروبوت بعيدًا عن العقبات، يظهر هذا الحقل المحتمل في الشكلين التاليين.

ويظهر أن الحد الأدنى العالمي واحد هو تكوين الهدف، والقيمة هي مجموع المسافة إلى تكوين هذا الهدف والقرب من العقبات، ولم يكن هناك أي تخطيط في توليد الحقل المحتمل الموضح في الشكل. وبسبب هذا، فإن الحقول المحتملة مناسبة تمامًا للتحكم في الوقت الفعلي.

يوضح الشكل الأول منهما مسار إنسان آلي يقوم بتسلق التلال، ففي العديد من التطبيقات، يمكن حساب الحقل المحتمل بكفاءة لأي تكوين محدد. وعلاوة على ذلك، فإن تحسين الكميات المحتملة تكون لحساب التدرج من إمكانات تكوين الروبوت الحالي، كما يمكن أن تكون هذه الحسابات فعالة للغاية خاصة عند مقارنتها مع خوارزميات تخطيط المسار، وكلها ذات أبعاد متسارعة في بعدية مساحة التهيئة (DOFs) في أسوأ الحالات.

حقيقة أن النهج الميداني المحتمل يدير لإيجاد مسار إلى الهدف بطريقة فعالة، حتى على مسافات طويلة في حيز التكوين، يثير السؤال إلى ما إذا كانت هناك حاجة للتخطيط في الروبوتات على الإطلاق. هل التقنيات الميدانية المحتملة كافية؟ أم أننا كنا محظوظين فقط في مثالنا؟ الجواب هو أننا كنا محظوظين حقًا أن الحقول المحتملة بها العديد من الحدود الدنيا المحلية التي يمكنها احتجاز الروبوت.

في الشكل الثاني منهما يقترب الروبوت من العائق بمجرد تدوير مفصل الكتف الخاص به، إلى أن يعلق على الجانب الخطأ من العائق، لكن الحقل المحتمل ليس غنياً بما يكفي لجعل الروبوت ينحني بكوعه حتى يوضع الذراع تحت العائق. بعبارة أخرى، تعتبر المراقبة الميدانية المحتملة كبيرة بالنسبة لحركة الروبوتات المحلية، ولكن في بعض الأحيان لا نزال بحاجة إلى التخطيط العالمي.

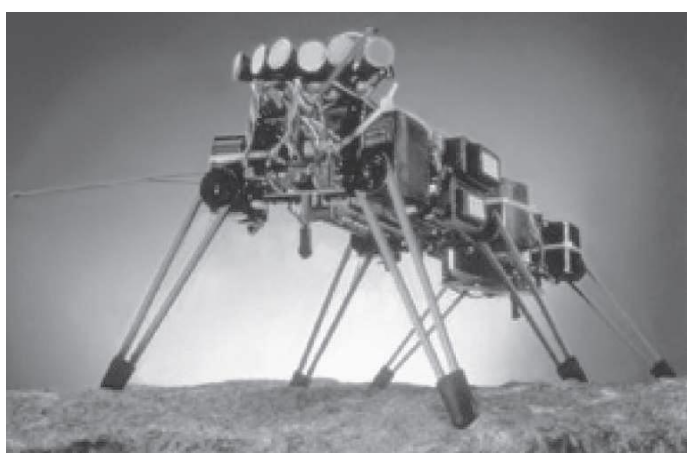
ومن العوائق المهمة الأخرى في المجالات المحتملة أن القوى التي يولدونها تعتمد فقط على العوائق ومواقع الروبوت وليس على سرعة الروبوت. وبالتالي، فإن التحكم في المجال المحتمل هو في الحقيقة أسلوب حركي، وقد يفشل إذا كان الروبوت يتحرك بسرعة.

التحكم الفعال:

لقد نظرنا حتى الآن في قرارات التحكم التي تتطلب بعض نماذج البيئة لإنشاء مسار مرجعي أو مجال محتمل، ووجدنا أن هناك بعض الصعوبات في هذا النهج.

- أولاً، غالباً ما يكون من الصعب الحصول على نماذج دقيقة بما فيه الكفاية، خاصة في البيئات المعقدة أو النائية، مثل سطح المريخ، أو للروبوتات التي لا تحتوي إلا على القليل من أجهزة الاستشعار.
- ثانيًا، حتى في الحالات التي يمكننا فيها تصميم نموذج بدقة كافية، قد تجعل الصعوبات الحسابية وأخطاء التعريب هذه التقنيات غير عملية. لكن في بعض الحالات، تكون بنية عامل منعكس باستخدام التحكم التفاعلي أكثر ملاءمة. على سبيل المثال، قم بتصوير إنسان آلي ذي أرجل يحاول رفع ساق فوق عائق، يمكن أن نعطي هذا الروبوت قاعدة تنص على رفع الساق بمقدار ساعة صغيرة وتحريكها للأمام، وإذا واجهت الساق عقبة، فقم بتحريكها مرة أخرى وابدأ مرة أخرى عند ارتفاع أعلى. يمكنك أن تقول أن h تمثل نموذجًا للعالم، ولكن يمكننا أيضًا التفكير في h كمتغير مساعد لجهاز التحكم في الروبوت، خالٍ من المعنى المادي المباشر.

أحد الأمثلة على ذلك هو الروبوت ذي الستة أرجل (hexapod)، كما هو موضح في الشكل التالي:



الذي تم توقيعه للمشي عبر التضاريس الوعرة، لكن أجهزة استشعار الروبوت غير كافية للحصول على نماذج من التضاريس لتخطيط المسار. علاوة على ذلك، حتى لو أضفنا أجهزة استشعار دقيقة بما فيه الكفاية، فإن درجات الحرية الإثني عشر (اثنان لكل ساق) ستجعل مشكلة التخطيط للمسار الناتج مستعصية على الحل.

ومع ذلك، فمن الممكن، لتحديد وحدة تحكم مباشرة دون نموذج عقل بيئي صريح. (لقد رأينا ذلك بالفعل مع وحدة تحكم PD، التي كانت قادرة على إبقاء ذراع الروبوت المعقدة على الهدف بدون نموذج صريح لديناميات الروبوت؛ ولكنها تتطلب مسارًا مرجعيًا ناتجًا عن نموذج (ميكانيكي) بالنسبة إلى hexapod الروبوت نختار أولا مشية، أو نمط حركة الأطراف. وتتمثل إحدى المشدات الثابتة بشكل ثابت في تحريك الجزء الأمامي الأيمن والأيمن واليسار الأوسط والأيمن للأمام (إبقاء الثلاث الأخرى الثابتة)، ثم تحريك الثلاث الأخرى. هذه المشية تعمل بشكل جيد على التضاريس المستوية، لكن على التضاريس الوعرة، قد تمنع العوائق الساق من التأرجح للأمام، ويمكن التغلب على هذه المشكلة من خلال قاعدة تحكم بسيطة بشكل ملحوظ، عندما يتم حظر حركة الأمام إلى الأمام، قم ببساطة بسحبها، ثم رفْعها إلى أعلى، وحاول مرة أخرى، فسوف تظهر وحدة التحكم الناتجة كآلة حالة محددة، وهو يمثل عامل منعكس مع الحالة، حيث يتم تمثيل الحالة الداخلية بواسطة مؤشر حالة الجهاز الحالية.

وقد تم العثور على المتغيرات من وحدة التحكم المدفوعة التغذية المرتدة هذه لتوليد ملحوظ أنماط المشي قوية وقادرة على مناورة الروبوت على التضاريس الوعرة، فمن الواضح أن وحدة التحكم هذه خالية من الطراز، ولا تتداول أو تستخدم البحث لتوليد عناصر التحكم، لكن تلعب التعليقات البيئية دورًا حاسمًا في تنفيذ المتحكم، ولا يحدد البرنامج وحده ما سيحدث بالفعل عندما يتم وضع الروبوت في بيئة وعرة. غالباً ما يشار إلى السلوك الذي يظهر من خلال تفاعل وحدة تحكم (بسيطة) وبيئة (معقدة) على أنه سلوك طارئ، بالمعنى الدقيق للكلمة، تظهر جميع الروبوتات التي نوقشت في هذا الفصل السلوك الناشئ، ويرجع ذلك إلى حقيقة أنه لا يوجد نموذج مثالي، غير أنه من الناحية

التاريخية، تم حجز هذا المصطلح لتقنيات التحكم التي لا تستخدم نماذج بيئية واضحة، لكن السلوك الناشئ هو أيضا سمة الكائنات البيولوجية.

العمليات السوفيتية الروبوتية:

تسمى منهجية هيكلة الخوارزميات بنية البرمجيات، وتشتمل البنية على لغات وأدوات لبرامج الكتابة، بالإضافة إلى فلسفة عامة لكيفية تجميع البرامج، ويجب أن تحدد معمارية البرامج الحديثة في مجال الروبوتات كيفية الجمع بين التحكم التفاعلي والتخطيط التداولي القائم على النموذج. من نواح عديدة، تمتلك التقنيات المتفاعلة والمتعمدة نقاط القوة والضعف المتعامدة، والتحكم المتفاعل هو مبني على المستشعر وapriprize لجعل القرارات ذات المستوى المنخفض في الوقت الحقيقي.

ومع ذلك، نادراً ما يقدم حلاً معقولاً على المستوى العالمي، لأن قرارات المراقبة العالمية تعتمد على معلومات لا يمكن استشعارها في وقت اتخاذ القرار، وبالنسبة لهذه المشاكل، فيعتبر التخطيط المتعمد اختيارًا أكثر ملاءمة. وبالتالي، فإن معظم معماريات الروبوتات تستخدم تقنيات تفاعلية في المستويات الدنيا من التحكم والتقنيات التداولية في المستويات الأعلى.

معمارية البدائل:

تعد بنية القطع الفرعية إطارًا لتجميع وحدات التحكم التفاعلية من أجهزة الحالة المحدودة، وقد تحتوي العقد في هذه الأجهزة على اختبارات لبعض متغيرات المستشعر، وفي هذه الحالة يكون تتبع التنفيذ لآلة حالة محددة مشروطًا بنتيجة مثل هذا الاختبار، كما يمكن وضع علامات على الأقواس مع الرسائل التي سيتم إنشاؤها عند عبورها، والتي يتم إرسالها إلى محركات الروبوت أو إلى أجهزة الحالة المحدودة الأخرى. بالإضافة إلى ذلك، تمتلك أجهزة الحالة المحدودة أجهزة توقيت داخلية (ساعات) تتحكم في الوقت المستغرق في اجتياز قوس، ويتم التحكم في الآلات الناتجة كآلات ذات حالة منتهية، أو

AFSMs، حيث يشير التكبير إلى استخدام الساعات. مثال على AFSM بسيط هو آلة أربع والتي تولد حركة الساق دوري لمشينا هيكسابود.

هذا AFSM تنفذ وحدة تحكم دوري، الذي لا يعتمد في الغالب على ردود الفعل البيئية. ومع ذلك، تعتمد مرحلة التأرجح الأمامي على ملاحظات المستشعر إذا كانت الساق عالقة، بمعنى أنها فشلت في تنفيذ التأرجح الأمامي، فيتراجع الروبوت عن الساق، ويرفعه أعلى قليلاً، ويحاول تنفيذ عملية التأرجح للأمام مرة أخرى.

وبالتالي، فإن وحدة التحكم قادرة على الاستجابة للطوارئ الناشئة عن تفاعل الروبوت وبيئته، وتوفر بنية القطع الفرعية أوليات إضافية لمزامنة AFSMs، والجمع بين قيم الإنتاج المتعددة، وربما متضاربة AFSMs. وبهذه الطريقة، فإنه يمكّن المبرمج من إنشاء وحدات تحكم معقدة على نحو متزايد بطريقة من أسفل إلى أعلى. في مثالنا، قد نبدأ مع AFSMs للأرجل الفردية، ثم تليها AFSM لتنسيق أرجل متعددة.

علاوة على ذلك، قد ننفذ سلوكًا أعلى مستوى مثل تجنب الاصطدام، والذي قد يتضمن النسخ الاحتياطي والتحويل.

فكرة إنشاء وحدات التحكم الروبوتي من AFSMs مثيرة للاهتمام للغاية، تخيل مدى صعوبة تكوين نفس السلوك مع أي من خوارزميات تخطيط مسار التكوين الموضحة في القسم السابق. أولاً، نحتاج إلى نموذج معدل تساوي التضاريس، تكون مساحة تكوين الروبوت مع ستة أرجل، كل واحدة منها مدفوعة بمحركين مستقلين، يبلغ مجموعها ثمانية عشر بعدًا (اثنا عشر بعدًا لتكوين الساقين، وستة لموقع وتوجيه الروبوت المتعلق ببيئته). حتى لو كانت حواسيبنا سريعة بما فيه الكفاية لإيجاد مسارات في مثل هذه المساحات عالية الأبعاد، فإنه سيكون علينا أن نقلق من التأثيرات السيئة مثل انزلاق الروبوت أسفل منحدر. وبسبب هذه التأثيرات العشوائية، من المؤكد أن مسارًا واحدًا من خلال مساحة التكوين سيكون هشًا للغاية، وحتى وحدة تحكم PID قد لا تكون قادرة على التعامل مع مثل هذه الحالات.

وبعبارة أخرى، فإن توليد سلوك الحركة عمدًا هو ببساطة مشكلة معقدة للغاية بالنسبة لخوارزميات التخطيط لحركة الروبوت الحالية. لسوء الحظ، فإن بنية subsumption لها مشكلاتها الخاصة.

- أولاً، يتم تحريك أجهزة AFSM عن طريق إدخال جهاز استشعار خام، وهو ترتيب يعمل إذا كانت بيانات المستشعر موثوقة وتحتوي على جميع المعلومات الضرورية لاتخاذ القرار، لكنه يفشل إذا كانت بيانات المستشعر يجب أن تكون مبنية بطرق غير بديهية بمرور الوقت. لذلك، تم تطبيق وحدات التحكم في النمط الفرعي على مهام بسيطة، مثل تتبع جدار أو التحرك نحو مصادر الضوء المرئي.
- ثانياً، إن غياب المداولات يجعل من الصعب تغيير مهمة الروبوت، وعادة ما يقوم الروبوت على النمط الفرعي بمهمة واحدة فقط، وليس لديه فكرة عن كيفية تعديل عناصر التحكم الخاصة به لاستيعاب الأهداف المختلفة.
- أخيراً، تميل أجهزة التحكم بنمط التعداد إلى أن تكون صعبة الفهم. من الناحية العملية، فإن التفاعل المتشابك بين العشرات من AFSMs المتفاعلة (والبيئة) يفوق ما يستطيع معظم المبرمجين البشريين فهمه؛ لكل هذه الأسباب، نادرًا ما يتم استخدام بنية المحتوى الفرعي في مجال الروبوتات، على الرغم من أهميتها التاريخية الكبيرة. ومع ذلك، فقد كان لها تأثير على البنى الأخرى، وعلى المكونات الفردية لبعض المعماريات.

معمارية ثلاثية الطبقات:

البنى الهجينة تجمع بين التفاعل والمداولة، ومن أشهر الطرائق المختلطة هي البنية ثلاثية الطبقات، التي تتكون من طبقة تفاعلية، وطبقة تنفيذية، وطبقة تداولية، توفر الطبقة التفاعلية تحكمًا منخفض المستوى للروبوت، يتميز بحلقة استشعار حساسة، ودورة قرارها غالبًا ما تكون حسب ترتيب الملي/ ثانية. ثم تعمل الطبقة التنفيذية (أو طبقة التتابع) بمثابة الغراء بين الطبقة التفاعلية والطبقة التداولية، ومن ثمَّ فإنه يقبل التوجيهات بواسطة الطبقة التداولية، وتسلسلها للطبقة التفاعلية.

على سبيل المثال، قد تتعامل الطبقة التنفيذية مع مجموعة من النقاط الفرعية الناتجة عن مخطط مسار تداولي، وتتخذ القرارات بشأن السلوك التفاعلي الذي يجب استدعاؤه، إن دورات القرار هذه في الطبقة التنفيذية عادة ما تكون في ترتيب ثانية، والطبقة التنفيذية مسؤولة أيضًا عن دمج معلومات المستشعر في تمثيل الدولة الداخلي. على سبيل المثال، قد تستضيف إجراءات روتين التعريب ورسم الخرائط عبر الإنترنت، تولد الطبقة التداولية حلولًا عالمية للمهام المعقدة باستخدام التخطيط، وبسبب التعقيد الحسابي الذي ينطوي عليه توليد مثل هذه الحلول، فغالباً ما تكون دورة قرارها في حدود دقائق.

تستخدم الطبقة التوضيحية (أو طبقة التخطيط) نماذج لصنع القرار، قد يتم تعلم هذه النماذج من البيانات أو تزويد المعلومات الحكومية التي تم جمعها في الطبقة التنفيذية، كما يمكن العثور على متغيرات البنية ثلاثية الطبقات في معظم أنظمة برامج الروبوت الحديثة، وتكون طريقة التحليل إلى ثلاث طبقات ليست صارمة للغاية، وتمتلك بعض أنظمة برامج الروبوت طبقات إضافية، مثل طبقات واجهة المستخدم التي تتحكم في التفاعل مع الأشخاص، أو مستوى متعدد الأطراف لتنسيق إجراءات الروبوت مع إجراءات برامج الروبوت الأخرى التي تعمل في نفس البيئة.

معمارية خطوط الأنابيب:

هناك بنية أخرى للروبوتات تُعرف باسم بنية خط الأنابيب، تمامًا مثل بنية القطع الفرعي، تقوم بنية خط الأنابيب بتنفيذ عملية متعددة في نفس الوقت. ومع ذلك، فإن الوحدات المحددة في هذه البنية تشبه تلك الموجودة في البنية ثلاثية الطبقات،

معمارية خط الأنبوب مثل التي تستخدم للتحكم في سيارة مستقلة، وتدخل البيانات خط الأنابيب هذا في طبقة واجهة المستشعر، طبقة الإدراك ثم يقوم بتحديث نماذج الروبوت الداخلية للبيئة استنادًا إلى هذه البيانات. بعد ذلك، يتم تسليم هذه النماذج إلى طبقة التخطيط والتحكم، والتي تعمل على تعديل خطط الروبوت الداخلية وتحويلها إلى عناصر تحكم فعلية للروبوت، ثم يتم توصيلها إلى السيارة من خلال طبقة واجهة السيارة،

إن المفتاح إلى بنية خط الأنابيب هو أن كل هذا يحدث بالتوازي، بينما تعالج طبقة الحد الأقصى لبيانات المستشعر أحدث أجهزة الاستشعار، فإن طبقة التحكم تعتمد خياراتها على بيانات أقدم قليلاً. بهذه الطريقة، فإن بنية خط الأنابيب مشابهة للدماغ البشري، لا توقف مراقبي الحركة عند استيعاب بيانات المستشعر الجديدة. بدلاً من ذلك، نحن ندرك ونخطط ونعمل جميعًا في الوقت نفسه، على أن يتم تشغيل العمليات في بنية خط الأنابيب بشكل غير متزامن، ويكون كل الحساب مستندًا إلى البيانات، وقوة وسرعة النظام الناتج.