

Lokomocja

- * Opisz różnicę między układem sterującym Ackermana a różnicowym układem sterującym.
- * Opisz różnicę między pojazdami holonomicznymi i nieholonomicznymi.
- * Uporządkuj poniższą listę typów lokomocji w kolejności zapotrzebowania na moc: pełzanie/ślizganie, bieganie, opony na miękkim podłożu, chodzenie i koła kolejowe.
- * Biorąc pod uwagę liczbę nóg, podaj wzór i oblicz liczbę możliwych zdarzeń nóg.
- * Opisz różnicę między wyważeniem statycznym i dynamicznym oraz dlaczego stabilność statyczna jest często uważana za pożądaną.
- * Zdefiniuj wielokąt wsparcia, punkt momentu zerowego i wybór akcji.
- * Określ rolę generatorów trajektorii odniesienia i centralnych wzorców w lokomocji.
- * Wymień trzy wirtualne chody.

Wstęp

W tym momencie czytelnik powinien znać zasady organizowania oprogramowania behawioralnego dla systemu robota i rozumieć, co znajduje się w „dolnym mózgu” robota. Związek między tym, co znajduje się w dolnej części mózgu, a faktycznym ruchem lub mobilnością robota, nie został rozwiązany. W szczególności czytelnik może się zastanawiać: Jak właściwie sprawić, by robot się poruszał? Rozważenie mobilności, a dokładniej lokomocji robota służącego do nawigacji, prowadzi do drugiego powszechnego pytania: dlaczego więcej robotów nie ma nóg? Istniejące roboty naziemne to głównie roboty kołowe lub gąsienicowe, ale zwierzęta mają nogi lub ślizgają się i pełzają. Ogólnie rzecz biorąc, sztuczna inteligencja nie jest powiązana z badaniami dotyczącymi lokomocji lub chodzenia, ponieważ podstawowe pojęcia dotyczą mechaniki i kontroli. Większość mechanizmów umożliwiających chodzenie i pływanie jest związanych z niskopoziomą kontrolą platformy, podobnie jak równania stabilnego lotu UAV nie są uważane za AI. Zamiast tego badania sztucznej inteligencji w zakresie lokomocji zazwyczaj koncentrują się na generowaniu trajektorii odniesienia (gdzie powinna się udać) i z jaką prędkością wykonać tę trajektorię (kiedy biegać, a nie chodzić). Dwa godne uwagi wyjątki to badania nad nauką chodzenia, zapoczątkowane pokazami Pattie Maes na Dżyngis i kontynuowanie wykorzystywania centralnych generatorów wzorców ze społeczności neuroetologii i sieci neuronowych. Chociaż sztuczna inteligencja rzadko zajmuje się lokomocją, każdy pracujący w robotyce AI potrzebuje pewnej znajomości lokomocji i jej terminologii. Dlatego ta Część zawiera przegląd biomimetycznej lokomocji robotów naziemnych, chociaż koncepcje, takie jak generatory wzorców dla chodów, można zastosować do pojazdów morskich. Część najpierw dotyczy lokomocji mechanicznej z kołami i gąsienicami, biorąc pod uwagę, że są to de facto mechanizmy standardowe. Następnie przechodzi do opisu biomimetycznych form lokomocji, czyli tego, jak roboty mogą poruszać się jak zwierzęta – z nogami lub bez. Wprowadzono lokomocję na nogach, dzieląc roboty na nogach na te korzystające z równowagi statycznej i te korzystające z równowagi dynamicznej. Po ustaleniu koncepcji punktu momentu zerowego i chodów, rozdział koncentruje się następnie na planowaniu oscylacji dla przesuwania nóg w chodach lub dostosowywanie konkretnej nogi ze stawami do terenu. Rozdział kończy się podsumowaniem tego, jak wybór działań i uczenie się są alternatywnymi podejściami do lokomocji.

Poruszanie się mechaniczne

Teoretycznie roboty naziemne mogą poruszać się na różne sposoby, albo w jakimś biologicznym odpowiedniku ślizgania się, czołgania lub chodzenia, albo poprzez czysto mechaniczny ruch, taki jak toczenie. W praktyce roboty naziemne niemal toczą się na kołach lub gąsienicach. Aby sterować robotem naziemnym, przydatne jest zrozumienie czterech sposobów kierowania robotem kołowym lub gąsienicowym oraz tego, czy ta metoda sterowania przybliża holonomiczność.

Holonomiczny kontra nieholonomiczny

HOLONOMICZNA

Wiele podejść w robotyce AI zakłada, że robot jest holonomiczny. Holonomic oznacza, że urządzenie można traktować jako punkt bezmasowy, który może natychmiast obrócić się w dowolnym kierunku (np. wirować na dziesięciocentówce). Robot holonomiczny ma dla AI dwie zalety. Po pierwsze, pozwala projektantowi zignorować zawiłości związane z mechanicznym sterowaniem robotem. Projektant nie musi się martwić, że robot zwolni przed wykonaniem skrętu lub koniecznością parkowania równoległego. Po drugie, holonomiczność znacznie upraszcza ścieżkę planowania i lokalizacji, jak zobaczymy w późniejszych wyzwaniach. Najpopularniejszym stylem robotów badawczych w latach 80. i 90. były roboty Denning i Nomad. Roboty te na dwa sposoby przybliżały pojazd holonomiczny. Po pierwsze, naśladowali punkt, będąc cylindrycznym, eliminując w ten sposób konieczność obliczania, czy róg robota uderzy w coś, jeśli robot się obróci. Po drugie, roboty miały wyspecjalizowane konstrukcje kołowe do przybliżania holonomicznego skrętu, a ponieważ nie poruszały się zbyt szybko, profile przyspieszenia i prędkości służące do zwalniania przed zatrzymaniem lub wykonaniem ostrego skrętu nie były konieczne.

NIEHOLONOMICZNY

W rzeczywistości roboty są nieholonomiczne. Roboty mają masę i bez względu na to, jak sprytnie zaprojektowano koło, zawsze jest jakiś ślizgacz, w którym robot skręca w bok, gdy się skręca. Zastosowanie sztucznej inteligencji w samochodach autonomicznych wymaga również zaakceptowania, że są one nieholonomiczne. Ponieważ roboty są nieholonomiczne, funkcje reaktywne lub deliberatywne będą musiały wiedzieć, jak szybko robot się porusza i jak daleko. Zasadniczo roboty będą miały enkodery wału lub optyczne do zliczania obrotów wału lub koła, jak opisano w części 10. Należy jednak pamiętać, że enkodery wału i optyczne działają dość dobrze przy szacowaniu rzeczywistej odległości dla pojazdów kołowych, ale nie w przypadku pojazdy gąsienicowe, z powodu błędów wprowadzanych przez różne powierzchnie cierne i stykowe generowane przez koła i gąsienice. Również ruchy obrotowe z pojazdami gąsienicowymi lub kołowymi generują błędy szybciej niż ruchy translacyjne.

Sterowanie

Ponieważ wszystkie roboty, a zwłaszcza roboty naziemne, są nieholonomiczne, ważne jest, aby zrozumieć, w jaki sposób są sterowane. Ta sekcja korzysta z taksonomii oferowanej przez Szama. Istnieją dwa główne style projektów kołowych, które przybliżają holonomiczne toczenie w łagodnych warunkach. Pierwotnie projekty te były zorientowane na badania lub ograniczone do wysoce wyspecjalizowanej aplikacji. Teraz zaczynają pojawiać się w niektórych rzeczywistych aplikacjach, takich jak Roomba i roboty telepresence, które pracują na równych podłogach. Te dwa style to:

* Synchroniczny napęd, w którym koła muszą się obracać, zbliżone do skrętu w miejscu, chociaż występuje pewien poślizg kół na podłożu. Koła są połączone za pomocą paska napędowego lub zestawu kół zębatach. Koła są zwykle wąskie, aby zminimalizować kontakt z podłożem, a tym samym ślizgają się.

* Koła dookólne, zwane również kołami Mercanum, to koła z rolkami, które umożliwiają poruszanie się robota prostopadle do głównego koła.

Dostosowując względne prędkości kół przednich i bocznych, robot może poruszać się na boki. Niestety, te koła mają tendencję do łatwego zapychania się brudem i żwirem w zastosowaniach zewnętrznych. Istnieją również dwa główne style sterowania pojazdami nieholonomicznymi, które są szeroko stosowane w rzeczywistych zastosowaniach, takich jak roboty z oddziałami bomb, samochody autonomiczne i roboty serwisowe. Poniżej opisano dwa style:

KIEROWANIE ACKERMANA

Kierowanie Ackermana to sposób kierowania samochodem; koła z przodu skręcają, aby prowadzić pojazd. Z technicznego punktu widzenia sterowanie Ackermanem odnosi się do mechanizmu, który reguluje koła w taki sposób, że koło po wewnętrznej stronie zakrętu obraca się bardziej niż koło po zewnętrznej stronie zakrętu, aby skompensować niewielką różnicę między wewnętrzną i zewnętrzną średnicą koła. To naprawdę nieholonomiczne, biorąc pod uwagę, jak trudno jest parkować równolegle.

KIEROWANIE POŚLIZGOWE

Sterowanie poślizgowe, znane również jako sterowanie różnicowe, to sposób kierowania czołgiem lub sypczaczem. Tory po każdej stronie można kontrolować niezależnie. Jeśli robot ma skręcić w lewo, lewy tor zwalnia, a prawy przyspiesza. Sterowanie poślizgowe nie ogranicza się do torów; można go zastosować w pojazdach kołowych. Poślizgowe sterowanie może pozwolić pojazdowi na przybliżenie holonomiczności, ale to, jak ściśle zależy od wielu zmiennych, takich jak korzystne nawierzchnie i moc platformy. Zastosowanie kółek samonastawnych jako wariantu sterowania poślizgowego zasługuje na dodatkowe omówienie i ostrzeżenie. Wózki inwalidzkie i wózki są często sterowane za pomocą dwóch kół skrętnych, a reszta platformy jest na kółkach. Kółka służą do podtrzymywania rozłożonego ciężaru platformy. Koła wózka inwalidzkiego są popychane różnicowo przez osobę, a pod nogami znajdują się kółka, które zapobiegają przewracaniu się wózka do przodu. Problem polega na tym, że kółka nie zapewniają żadnego oporu ani kierunku. Gdy osoba kieruje kołami w jednym kierunku, kółka z przodu mogą obrócić się w innym kierunku, tworząc sytuacje trudne do opanowania. Wczesna robotyka próbowała wykorzystywać zmotoryzowane wózki inwalidzkie jako platformy badawcze i odkryła, że bardzo trudno je kontrolować.

POLIMORFICZNE SYSTEMY PŁOZOWE

Na dyskusję zasługują również polimorficzne systemy poślizgowe, powszechnie stosowane w robotach wojskowych. Te roboty mają gąsienice, które mogą zmieniać kształt, aby dostosować się do terenu. Aby zobaczyć zalety polimorficznego systemu płozowego, rozważ czołg. Przypomnijmy najpierw, że gąsienice na czołgu mają długą powierzchnię styku z ziemią. Im większy obszar styku gąsienic, tym większa przyczepność i większe prawdopodobieństwo, że gąsienica będzie mogła się poruszać i wspinać. Jednak im większa powierzchnia styku, tym więcej mocy potrzeba do obracania się, gdy zbiornik obraca się na torze wewnętrznym, a tor wewnętrzny musi pokonać tarcie, aby działać jak oś obrotu. W związku z tym pożądane byłoby posiadanie systemu torów, w którym wielkość powierzchni styku mogłaby być dostosowana do sytuacji. Po drugie, przypomnijmy, że zbiorniki mają na ogół geometrię trapezową; dlatego przód (i czasami tył) toru jest faktycznie podniesiony, aby ułatwić czołgowi wspinanie się po obiektach. Polimorficzne systemy płozowe pozwalają na zmienną geometrię torów. Jedno podejście, polega na stworzeniu systemu gąsienicowego, w którym ciągły tor zmienia kształt z płaskiego na trójkątny. Zaletą tego systemu jest to, że jest wysoce adaptacyjny i wymaga mniej energii. Wadą jest to, że gdy tory podnoszą się, aby wspiąć się na przeszkodę lub zakręt, winda tworzy lukę lub otwór. Przedmioty lub zanieczyszczenia mogą dostać się do szczeliny, powodując oddzielenie

się toru od kół poruszających torem, co ostatecznie unieruchamia robota. Drugą wadą jest to, że gąsienice są zwykle elastyczne i luźno dopasowane, tak że mogą dostosowywać się do różnych konfiguracji, ale gąsienice mogą zsuwać się z rolek lub zsuwać się z toru. Innym podejściem do polimorficznego sterowania poślizgowego jest dodanie płetw gąsienicowych. Robot opiera się na parze ciągłych płaskich gąsienic, ale może podnosić i opuszczać płetwy gąsienicowe, aby pokonywać przeszkody lub uzyskać lepszą przyczepność lub utrzymać równowagę. Przykładem jest Endeavour Packbot. Inne systemy dodają również płetwy z tyłu. Płetwy eliminują ryzyko otwartego toru i umożliwiają robotowi wyprostowanie się lub czołganie za pomocą płetw do odpychania się lub ciągnięcia do przodu

Lokomocja biomimetyczna

Centralną koncepcją lokomocji biomimetycznej jest to, że występuje okresowy lub powtarzalny ruch, albo wibracja ciała, albo drgania kończyn. Korzystając z koncepcji ruchu okresowego, Siegwart, Nourbakhsh i Scaramuzza dzielą lokomocję biomimetyczną na pięć głównych kategorii w kolejności malejącego zużycia energii. Pełzanie występuje, gdy czynnik pokonuje tarcie poprzez wibracje wzdłużne lub ruch. Przykładem w naturze jest gąsienica, która kurczy się wzdłuż ciała, aby poruszać się do przodu, tworząc powolną sinusoidalną falę ruchu. Robot Active Scope Camera (ASC) używany do przeszukiwania gruzów podczas zaważenia się budynku w 2007 roku w Jacksonville jest przykładem robota pełzającego²⁰³. Zamiast powielać sinusoidę, projektanci zastosowali wibracje do poruszania robotem bez skomplikowanych mechanicznych deformacji. ASC otoczony jest „skórą” z RZEPÓW nachyloną pod kątem podobnym do „włosów” w owłosionej gąsienicy. Jako robot, wibruje na całej osi, VELCRO styka się z powierzchniami i jest lekko wypychany do przodu ze względu na kąt nachylenia. Crawling to najbardziej energochłonna kategoria ruchu, więc nie powinno dziwić, że ASC jest podłączony do dużego zasilacza.

POŚLIZG

Poślizg występuje, gdy środek pokonuje tarcie poprzez poprzeczne wibracje lub ruchy. Przykładem w naturze jest wąż, który porusza się sinusoidalnie na boki, używając swoich łusek do zwiększenia tarcia umożliwiającego obracanie się. Wężowy robot do poruszania się wykorzystuje wibracje poprzeczne. Należy zauważyć, że większość robotów nazywanych „wężami” nie porusza się w poprzek. W rzeczywistości odtwarzają elastyczność węża lub tułowia słonia, aby poruszać się przez ciasne przestrzenie o dużej krzywiznie lub wspinać się lub chwycić kije. Atrakcyjność trąby węża lub słonia polega na tym, że jest mały, ale bardzo elastyczny, ponieważ ma wiele stawów; w inżynierii nazywa się to mechanizmem hipernadmiarowym. Elastyczne roboty często używają serii wielokierunkowych kół, aby osiągnąć taką samą mobilność jak wąż, ale bez aspektów tarcia. Robot Snoopy jest zasadniczo trąbą słonia, która może sięgnąć do dziur w gruzach utworzonych przez standardowe narzędzia do wiercenia w betonie. Zwróć uwagę, że na podstawie robota zamontowana jest zewnętrzna kamera, dzięki czemu operator może zobaczyć, gdzie znajduje się pień w stosunku do świata. Przypomnij sobie, że kamera zapewnia widok eksproprioceptywny. Głównym wyzwaniem związanym z hipernadmiarowym robotem jest wykrywanie, gdzie się znajduje i jak powinien się poruszać w określonym terenie i stanie nawierzchni.

BIEGANIE

Bieganie występuje, gdy agent pokonuje energię kinetyczną ruchem oscylacyjnym wahadła wielowahaczowego, który prowadzi do ruchu głównie poziomego. Wahadło wielowahaczowe to inżynierska reprezentacja nogi i stawów. Robot RHex jest przykładem biegnącego robota, choć na pierwszy rzut oka nie przypomina zwierzęcia. RHex przybliży wielowahaczowe wahadło nogi karalucha jako sprężynę. Karaluch nie porusza zbyt daleko stawami na nogach; zamiast tego stawy służą jako

sposób na przekształcenie nogi w sprężynę, aby dostosować się do terenu i odbić się od niego. RHex likwiduje staw. Powiela ruch oscylacyjny nóg, obracając sprężyny, aby popchnąć ciało do przodu. RHex uderza w ziemię i odpycha się od niej, gdy noga kończy okrąg obrotu. RHex jest jednym z rezultatów stylu analizy biomechaniki zapoczątkowanego przez Roberta Fulla. Skakanie to kolejny sposób, w jaki agent może pokonywać energię kinetyczną ruchem oscylacyjnym nóg. W tym przypadku oscylacje powodują głównie ruch pionowy. Wczesne prace założyciela Boston Dynamic, Marca Raiberta, który zbudował pierwsze roboty do biegania i skakania, wykorzystywały nogi z tłokami do powielenia, jak stopa i nogi odpychają się od ziemi. Teza Marca Raiberta, *Legged Robots that Balance*, została opublikowana w 1986 roku. Towarzyszący mu film z jego pracy dyplomowej „*Roboty that run. I przewrócić się i upaść*”. Film zawierał szpulę z wpadką, pokazującą niezapomniane wydarzenia, takie jak jednonogi skoczek skaczący na przeszkodę zamiast przez nią. Kołowrotek wpadki nie umniejszał wielu naukowych wkładów badań; zamiast tego zwiększyło pewność, że niezwykle wyniki Raiberta nie były wynikiem nadmiernej inżynierii demonstracji. Bieganie, skakanie i chodzenie są integralną częścią poruszania się na nogach i stanowią odrębny kierunek studiów. Raibert motywuje roboty na nogach, zauważając, że tylko połowa ziemi jest dostępna dla kół, a nogi oferują co najmniej trzy zalety w porównaniu z innymi formami poruszania się. Nogi mogą umożliwić agentowi znalezienie izolowanych punktów oparcia, podczas gdy koła wymagają ciągłego kontaktu. Nogi mogą się dostosować, aby zapewnić aktywne podwieszenie dla organizmu środka. Wreszcie nogi są stosunkowo energooszczędne. Chodzenie z nogami nie jest tak energochłonne, jak inne biologiczne sposoby raczkowania, ślizgania się i biegania. Koszt energii związany z używaniem nóg dobrze wypada w porównaniu z energią potrzebną do jazdy oponami po miękkim podłożu.

- Crawling/sliding
 - Running
 - Tires on soft ground
 - Walking
 - Railway wheels
- 
- Increasing
power demand***

Lokomocja na nogach

REFERENCYJNE TRAJEKTORIA

LEG EVENT

Jak pokazano w poprzedniej sekcji, nogi mogą zapewnić wszechstronną lokomocję przy niższych kosztach energii dla lokomocji biologicznej. Jeśli chodzi o robotykę AI, lokomocja na nogach składa się z dwóch elementów: obliczania trajektorii odniesienia lub miejsca, w którym robot powinien się udać, oraz obliczania chodu lub określonego rodzaju oscylacji, aby poruszać się po trajektorii odniesienia. Obliczenie trajektorii referencyjnej to zadanie planowania ścieżki i ruchu, opisane w Części 14, podczas gdy ten rozdział opisuje obliczanie chodu. Obliczenie chodu może być trudne, ponieważ istnieje duży zestaw możliwych ruchów nóg, zwanych zdarzeniem nóg, aby stworzyć ruch oscylacyjny, a ruchy oscylacyjne muszą być dostosowane do terenu, aby nogi lądowały na właściwych stopach w celu utrzymania równowagi.

Liczba leg event

Siegwart, Nourbakhsh i Scaramuzza zauważają, że liczba możliwych zdarzeń nóg, N , potrzebnych do uzyskania lokomocji na nogach, wzrasta czynnikiem.

$$N = (2k-1)!$$

gdzie k = liczba nóg. Używając tego wzoru dla agenta z dwiema nogami, $k = 2$, a zatem istnieje $N = 6$ możliwych kombinacji dyrektyw kontrolnych dla dwóch nóg. Kombinacje są pokazane w tabeli, gdzie lewa noga może poruszać się w górę, U , w dół, D lub wcale, $-$.

<i>LeftLeg</i>	<i>RightLeg</i>
<i>U</i>	$-$
$-$	<i>D</i>
$-$	<i>U</i>
<i>D</i>	$-$
<i>U</i>	<i>U</i>
<i>D</i>	<i>D</i>

$N = 6$ nie wydaje się bardzo duże, ale rozważ N dla szęcionoga takiego jak pszczoła. W takim przypadku $k = 6$ i $N = 39, 916, 800$. Problem kontroli wzrasta, jeśli noga ma stawy. Teraz sygnał sterujący nie jest tylko w górę, w dół lub wcale, ale musi sygnalizować, które części lub połączenia nogi poruszają się i o ile. Ludzka noga jest połączona w taki sposób, że istnieje siedem stopni swobody lub siedem możliwych dyrektyw kontrolnych do określenia, tylko po to, aby przesunąć nogę do pożądanego kroku, a to ignoruje ułożenie stopy i palców.

CHÓD

W wyniku dużej liczby zdarzeń nóg podejście polega na połączeniu ruchów w mały zestaw wstępnie obliczonych skoordynowanych ruchów zwanych chodami. Poruszanie agenta wzdłuż trajektorii odniesienia staje się wtedy kwestią określenia chodu, aby uzyskać pożądaną prędkość, a następnie dodając reaktywną kontrolę, aby dostosować rzeczywisty odgłos kroków do terenu. Jeśli teren jest zbyt trudny, kontrola powróci do „wolnego chodu”, w którym agent musi ręcznie obliczać ruchy nóg.

Balans

Oczywistym wyzwaniem w poruszaniu się na nogach jest utrzymanie równowagi. Jednym z podejść jest tworzenie statycznych chodzików, czyli robotów, które są zawsze statycznie zrównoważone. Drugim jest zapewnienie równowagi dynamicznej.

Równowaga statyczna

To, czy agent jest zrównoważony podczas ruchu, zależy od pojęcia wielokąta wsparcia. Na przykład chodzenie można modelować jako krok, w którym nogi agenta powielają toczenie się jak wielokąt w okręgu, aby pokonać grawitację i poruszać się do przodu.

WSPARCIE WIELOKĄTA

ZRÓWNOWAŻONY STATYCZNIE

Wielokąt podporowy jest definiowany jako wypukły kadłub punktów styku z podłożem. W przypadku robotów punktami styku są nogi dotykające ziemi. Jeżeli środek masy (COM) agenta znajduje się w wieloboku nośnym, agent jest zrównoważony statycznie. Wielokąt podparcia może pomóc zilustrować, dlaczego poruszanie się dwunożne jest trudne. Wielokąt degeneruje się do linii wymagającej bardziej precyzyjnych pozycji, aby agent pozostał w równowadze.

STABILNOŚĆ STATYCZNA

Pierwsze roboty na nogach zostały zaprojektowane tak, aby były wyważone statycznie, gdy były nieruchome, a także podczas ruchu, co jest znane jako stabilność statyczna. Stabilność statyczna oznacza, że w każdej chwili robot znajduje się w równowadze statycznej. Oznacza to również, że nogi utrzymują równowagę bez żadnej biernej korekty, lub że gdyby robot odłożył kilka nóg, nogi były mocno osadzone na ziemi i nie ześlizgiwałyby się. Stabilność statyczna jest w naturze dość rzadka, a najlepszym przykładem jest to, jak homar chodzi. Agent zwykle ma co najmniej sześć nóg, ponieważ musi je podnieść. Jeśli w dowolnym momencie ma trzy nogi na ziemi, aby utworzyć wielokąt podpory, COM pozostaje w zmieniającym się wieloboku podpory. Agent odkłada jeden zestaw nóg, aby utworzyć nowy wielokąt wsparcia bez naruszania obecnej równowagi statycznej. Robot zaczyna ze wszystkimi nogami na ziemi. Następnie agent podnosi zestaw nóg, L1, ale pozostawia zestaw nóg, L2, na ziemi, aby utrzymać równowagę statyczną. Uniesione nogi, L1, są następnie przesuwane do przodu i opuszczane, w wyniku czego wszystkie nogi z powrotem padają na ziemię. Teraz L2 są unoszone i huśtają się do przodu, popychając ciało agenta do przodu. Pamiętaj, że nogi muszą iść prawie prosto w dół, ponieważ nie ma korekty kroków. W rezultacie agent nie może wywijać tych nóg bardzo daleko do przodu. Utrzymywanie stabilności statycznej podczas chodzenia nazywa się chodzeniem statycznym. Zwykle jest powolny. W przypadku homarów pomaga homarowi poruszać się po silnych prądach podwodnych; prędkość jest podporządkowana bezpiecznym ruchom. Słynny statyczny robot kroczący to Ohio State Hexapod autorstwa Kena Waldrona, choć rozczarowujący z perspektywy sztucznej inteligencji, ponieważ tradycyjne metody teorii sterowania służące do obsługi sześcionoga nie były w stanie zapewnić kontroli w czasie rzeczywistym za pomocą ówczesnych procesorów. W końcu robota trzeba było zdalnie sterować. Ambler, kolejny statyczny chodzik, został zbudowany przez „Red” Whitakera w Centrum Robotyki Terenowej Uniwersytetu Carnegie Mellon (CMU), aby móc utrzymać platformę czujników na odpowiedniej wysokości, pokonując większość skał, ale z ogromnym spadkiem rozmiaru, waga i moc. W końcu badacze łazików planetarnych skłaniali się ku pojazdom kołowym z pewnym rodzajem przegubu, aby zachować stabilność, taką jak widać z Grzechotnika Sandia National Laboratories. Rozszerzenie filozofii projektowania Amblera zmanifestowało się w statycznych chodzących robotach Dante. Zostały one zbudowane, aby zjeżdżać po stromych kanionach i wulkanach na Marsie (i Ziemi). Dante zdołał bez problemu opuścić się przez większość drogi do wulkanu na Antarktydzie, ale nie mógł się z niego wydostać. Został upuszczony podczas podnoszenia helikopterem, skręcając ramę.

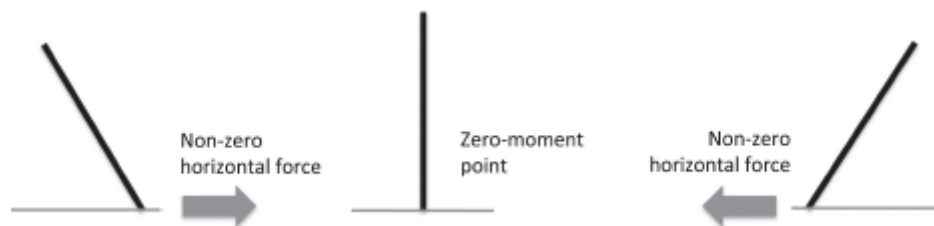
Równowaga dynamiczna

RÓWNOWAGA DYNAMICZNA

Większość zwierząt polega na równowadze dynamicznej, dlatego badania koncentrują się na tworzeniu robotów, które nie muszą zachowywać statycznej stabilności podczas ruchu. Rozważmy normalne ludzkie bieganie: jest taki moment, w którym żadna noga nie leży na ziemi, gdy człowiek odepchnął się od jednej stopy i unióś ją, by zacząć machać nią do przodu, ale druga noga jeszcze się nie przyłożyła. Wyzwaniem w równowadze dynamicznej jest upewnienie się, że gdy agent ląduje na przedniej nodze (nogach), nogi nie wyślizgną się spod spodu, powodując upadek, a nogi są ustawione tak, że agent może z nich odskoczyć.

PUNKT MOMENTU ZEROWEGO

Jest to powszechnie modelowane jako umieszczanie nóg w taki sposób, że na nodze znajduje się punkt zerowy. Zgodnie z rysunkiem



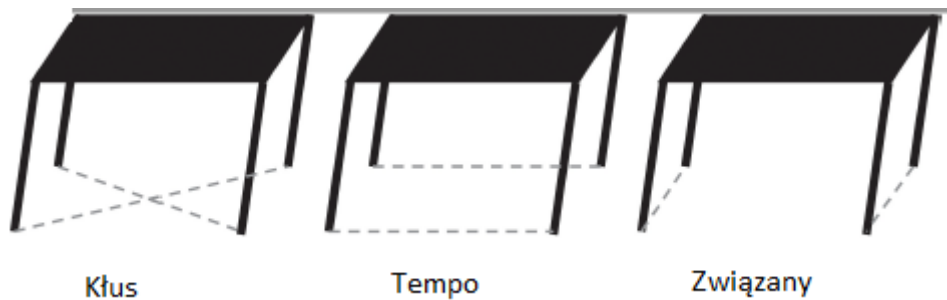
pomyśl o nodze jak o odwróconym wahadle, w którym noga może stykać się z podłożem pod pewnymi kątami. Punkt zerowy momentu (zmp) to kąt, w którym równoważą się poziome siły pędu i tarcia, dzięki czemu robot nie powinien spadać. Chociaż nie jest to lokomocja na nogach, przykładem wykorzystania równoważenia sił poziomych jest Segway, w którym kierowca pochyla się do przodu, jak gdyby odwrócone wahadło, tworząc siłę poziomą do przodu, która wytrąca Segway z równowagi i powoduje, że porusza się do przodu, aby spróbować ponownie zrównoważyć. ZMP służy do obliczania, gdzie umieścić nogę, ale ma na to również wpływ tarcie i rodzaj stopy na nodze. Podobnie jak w przypadku chodzenia statycznego, poruszanie się z wykorzystaniem zasady ZMP do postawienia nogi zazwyczaj musi „tupać”, aby stopa przylegała płasko do podłoża, aby się nie ześlizgnęła.

Chód

WIRTUALNY CHÓD

Możliwość obliczenia ZMP jest jednym z kroków w dynamicznej równowadze lokomocji na nogach, ale wciąż pozostaje kwestia zmniejszenia liczby zdarzeń na nogach. Kluczową koncepcją w upraszczaniu lokomocji jest organizowanie oscylacji nóg w wirtualne chody, po raz pierwszy wprowadzone przez Marca Raiberta. Weź pod uwagę, że koń ma dobrze zdefiniowane chody lub wzorce zdarzeń nóg, takich jak kłus lub galop. Wzory działają tak samo dla innych organizmów, które mają więcej niż cztery nogi, takich jak stonoga. Chód można również wykorzystać do opisu lokomocji dwunożnej, gdzie dwie nogi są traktowane jako przypadek zwyrodnieniowy. Idea chodów wirtualnych polega na tym, że nogi są zebrane w dwa zestawy, A i B, a wszystkie nogi w grupie A poruszają się w tym samym czasie w ten sam sposób, a następnie wszystkie nogi w grupie B poruszają się w ten sam sposób w tym samym czasie. W przeciwieństwie do równania 9.1, w którym obliczenie wzrastało czynnikowo wraz z liczbą nóg, obliczenie jest stałe bez względu na to, ile nóg ma agent. Na rycinie 9.9 przedstawiono trzy podstawowe chody w zależności od tego, jak sparowane są nogi:

- * Kłus, gdzie ukośne pary nóg poruszają się naprzemiennie
- * Tempo, w którym boczne pary poruszają się naprzemiennie
- * Związany, gdzie pary przednie i tylne naprzemiennie poruszają się



Nogi ze stawami

Wirtualne chody zmniejszają wysiłek związany z planowaniem liczby wydarzeń nóg w celu uzyskania równowagi dynamicznej, ponieważ zmniejszają liczbę nóg do dwóch wirtualnych serii. Jednak chód ogólnie traktuje nogi jako odwrócone wahadło, ignorując fakt, że nogi często mają stawy. Stawy w nogach dają agentowi mechanizm, dzięki któremu podskakuje energią kinetyczną, a tym samym zwiększa zakres ruchu i zdolność dostosowywania się do terenu. Przywracają również złożoność obliczeniową. Rzeczywiście, wczesne roboty Raibera wykorzystywały tłoki na nogach, aby przekazywać energię kinetyczną bez konieczności radzenia sobie z mechanicznymi i kontrolnymi zawiłościami bardziej tradycyjnej nogi przegubowej. Zgodnie z ideą wirtualnych chodów, stawy w nogach są zazwyczaj poruszane zgodnie z małym zestawem wzorców oscylacyjnych lub makr. Podczas gdy chód był badany od tysięcy lat w hodowli zwierząt (wystarczy wziąć pod uwagę jazdę konną w historii i ujeżdżenie w ostatnich czasach), wzorce poruszania stawami na jednej nodze nie zostały dobrze zrozumiane. Istnieją dwa główne podejścia do określania ruchu nóg ze stawami. Jednym z podejść jest użycie kamer do przechwytywania ruchu w celu określenia, w jaki sposób osoba lub zwierzę porusza nogami w określonej sytuacji, a następnie powielenie tego ruchu. Drugim jest opracowanie centralnych generatorów wzorców (CPG) dla każdego złącza.

GENERATOR WZORÓW CENTRALNYCH

W biologii istnieją struktury neuronowe zwane centralnymi generatorami wzorców (CPG), które wytwarzają drgania, takie jak oddychanie, połykanie i poruszanie się, które wymagają zsynchronizowanych ruchów. Po aktywacji CPG oscylacje występują bez potrzeby wykrywania lub innych dodatkowych wejść. Jednakże domyślny wzór można modyfikować lub dostrajać za pomocą wykrywania; na przykład czasami musisz skoncentrować się na połknięciu dużej porcji jedzenia lub iść dalej niż w normalnym tempie. Idealnie byłoby opracować CPG, który tworzy wielokąt toczący się ruchu nóg w górę, do przodu i w dół, a następnie wierzchołki wielokąta można dostosować, aby dostosować się do wykrytego terenu. Podczas gdy sztuczna inteligencja generalnie ignoruje lokomocję, badacze sztucznej inteligencji, którzy specjalizują się w neuroetologii, badają CPG. Najczęstszą implementacją CPG jest wariant nieliniowego równania Van der Pola. Równanie zostało opracowane w celu wytworzenia sinusoidalnych fal radiowych, które dają domyślnie zsynchronizowane oscylacje kończyn i wyjaśniają szum w elektronice, który można wykorzystać do dostrojenia oscylacji synchronizacji do zdarzeń zewnętrznych. Wyzwanie polega na tym, że równania Van der Pola wymagają metody numerycznej do rozwiązania oraz że CPG zostały przebadane w biologii i wdrożone w robotyce dla pojedynczego złącza, pozostawiając pytanie, jak scharakteryzować i wdrożyć kolekcję CPG, aby uzyskać wielostawowa noga do poruszania się w chodzie. Te dwie metody, przechwytywanie ruchu i CPG, nie wykluczają się wzajemnie. Przechwytywanie ruchu może udokumentować, jak chód zmienia się w celu dostosowania do terenu, na przykład wchodzenia po schodach, co może być następnie włączone jako wejście strojenia do CPG lub nowego CPG, który jest odpowiednio udostępniany. Wybór akcji

W poprzednich sekcjach omówiono, w jaki sposób działania związane z poruszaniem się są wybierane na jeden z dwóch sposobów: poprzez wyraźne zaplanowanie każdego kroku przez planistę (swobodne chodzenie) lub za pomocą ustalonych wzorców, takich jak chód i centralne generatory wzorców. Istnieje jednak trzeci sposób: nauka składania istniejących schematów motorycznych, tak aby agent nauczył się poruszać. Podejście do uczenia się wzmacnia zasady i zalety zachowań. Nauka robotów została omówiona bardziej szczegółowo w Części 16.

WYBÓR AKCJI

Wybór akcji w robotyce AI oznacza, w jaki sposób agent wybiera zachowania, które mają zostać zaimplementowane w danym momencie. Wrodzone mechanizmy zwalniające są technicznie formą wyboru akcji, ale są one wstępnie zaprogramowane i okablowane. Większym pytaniem jest to, w jaki sposób wybiera się działania i uczy się nowych wydarzeń. Początkowo w sztucznej inteligencji zakładano, że działania muszą być wybierane celowo, z wyraźnym planowaniem, ale gdy sztuczna inteligencja badała reaktywność, badacze zaczęli badać wykorzystanie wrodzonych mechanizmów uwalniania i podobnych mechanizmów do wyboru działań wykonywanych bez planowania. W 1990 roku Patty Maes i Rodney Brooks zademonstrowali Czyngisowi, szczęśliwemu robotowi-owadowi przedstawionemu w części 1 (patrz rysunek 6.3), który włącza się i uczy chodzić na trójnogu w ciągu 1 minuty i 45 sekund przy użyciu wyłącznie reaktywnego wyboru akcji. Czyngis użył dwóch czujników dotykowych, przedniego i tylnego, na twarzy i tyle. Jeśli jeden lub oba czujniki dotykowe zostały aktywowane, korpus robota leżał na ziemi lub był mocno przechylony. Ponieważ żaden z tych warunków nie jest pożądany, wytworzyły one negatywny sygnał sprzężenia zwrotnego. Czyngis miał również wleczone koło do pomiaru ruchu do przodu, które generowało pozytywne sprzężenie zwrotne, gdy koło poruszało się do przodu. Idealnie byłoby, gdyby ciało robota unosiło się nad ziemią i poruszało do przodu. Wybór działania Czyngisa był ograniczony do małego zestawu 13 zachowań. Na każdą nogę występowały dwa zachowania (huśtawka do przodu, huśtawka do tyłu), w sumie 12, plus dodatkowe zachowanie równowagi poziomej, aby rozłożyć nogi. Pozycja każdej nogi w górę lub w dół była wykrywana za pomocą wewnętrznych czujników. Korzystając z tej bardzo prostej konfiguracji, Czyngis nauczył się chodzić, ucząc się wektora, który reprezentuje zestaw warunków wstępnych (lub wyzwaczy) dla każdego z sześciu zachowań nóg. Mogą być włączone, wyłączone, nie obchodzi mnie to. Nogi zaczynają się wymachiwać, a każda noga losowo próbuje swoich dwóch różnych zachowań. Na każdym kroku system wykorzystywał statystyki do skorelowania warunków wstępnych dla każdej z odnóg (Co zrobiłem, co było właściwe?) z informacją zwrotną. To zaktualizowałoby wektor rejestrujący czas każdego ruchu nóg. Robot szybko nauczył się statycznego chodu na statywie, w którym, jeśli jedna noga była podniesiona, pozostałe dwie na statywie były uniesione, a co najmniej dwie pozostałe nogi były opuszczone. Chociaż ta praca nigdy nie została powszechnie przyjęta do poruszania się w ogóle, miała wpływ na debatę na temat tego, kiedy reagować, a kiedy rozmyślać, ponieważ jest to dowód istnienia, że rozważanie nie jest konieczne do chodzenia. Ustanowiła również scenę dla neuroetologicznych badań chodów i CPG.

Podsumowanie

Odniesiono się do dwóch pytań postawionych na początku rozdziału. Pierwsze pytanie brzmi: jak właściwie sprawić, by robot się poruszał? Locomocja naziemna wykorzystuje zasady mechaniczne lub biomimetyczne. W praktyce ruch mechaniczny z kołami lub gąsienicami dominuje w robotyce, ponieważ mechanizmy są łatwe do zbudowania, sterowania i utrzymują stabilną platformę w porównaniu z nogami wieloprzegubowymi. Dwa najpopularniejsze style kierowania to kierowanie różnicowe lub kierowanie poślizgowe oraz kierowanie Ackermana, czyli kierowanie jak w samochodzie. Skid Steering to bardzo przybliżone przybliżenie pojazdu holonomicznego. Roboty AI początkowo zakładali holonomiczność, aby ignorować kwestie sterowania i skupiać się wyłącznie na funkcjach AI.

Lokomocja biomimetyczna waha się od chodzenia po raczkowanie lub ślizganie się. Jak widać po pełzaniu i ślizganiu się, nie ma gwarancji, że biomimetyczna lokomocja będzie energooszczędna, chociaż nogi zwierząt mają dobrą energetykę (choć mniej w przypadku robotów z nogami). W praktyce koła pozostają najbardziej energooszczędną formą poruszania się robotów naziemnych, ale teoretycznie nogi są najbardziej wszechstronne. W rezultacie przeprowadzono wiele badań dotyczących poruszania się na nogach, w tym tworzenie nóg, które wyglądają jak sprężyny; jednak do praktycznych nóg, jako części kompletnego robota, jeszcze daleko. Jeśli robotyk wykorzystujący sztuczną inteligencję pracuje z nogami, warto rozważyć poruszanie się na nogach jako dwa podproblemy: generowanie trajektorii odniesienia (gdzie robot ma się poruszać) i planowanie oscylacji nóg (jak będzie poruszał nogami). Jawne planowanie oscylacji zestawu nóg nazywa się „chodzeniem swobodnym” i wymaga czynnikowej liczby obliczeń, $O(n!)$. Złożoność obliczeniowa i mechaniczna nóg odpowiadają na drugie pytanie postawione na początku tego rozdziału: Dlaczego więcej robotów nie ma nóg? Aby uprościć złożoność obliczeniową, robotycy łączą nogi i wytwarzają zestaw drgań identycznych z chodami zwierząt. Trzy powszechnie używane wirtualne chody to kłus, stymulacja i skakanie. Robot wykorzystuje chód, który może być obliczany przez centralny generator wzorców, a następnie dostosowuje chód każdej nogi, aby zachować równowagę i dostosować się do terenu. Podczas gdy chód ułatwia planowanie oscylacji, problem równowagi i przystosowania się do terenu pozostaje nietrywialny. Platformy z wczesnymi nogami wykorzystywały równowagę statyczną, aby zagwarantować, że środek masy platformy zawsze pozostanie w wieloboku podparcia zapewnianym przez nogi. Niestety równowaga statyczna jest powolna i kłopotliwa. Równowaga dynamiczna jest szybsza, ale trudniejsze jest zrównoważenie sił statycznych i dynamicznych. Umieszczenie stopy staje się bardziej krytyczne, ponieważ wymaga, aby noga wylądowała w punkcie, który wytworzy produkt z zerowym momentem, gdy robot obraca się na tej nodze. Chód ładnie odwzorowuje koncepcję zachowań i sztucznej inteligencji. Co więcej, CPG jest naturalnym rozszerzeniem robotyki behawioralnej i wzmacnia wartość tradycji wykorzystywania warunków biologicznych i etologicznych. Uczenie maszynowe było badane we wczesnych dniach chodzących robotów, przede wszystkim jako motywacja do badania problemu wyboru działań lub sposobu wybierania i grupowania zachowań w celu wykonania zadania. Jednak CPG są bardziej praktyczne i nadają się do nóg z wieloma przegubami.