

Mobilní robotika

Karel Košnar

Katedra kybernetiky, Fakulta elektrotechnická, České Vysoké Učení Technické v Praze
kosnar@labe.felk.cvut.cz

Abstract:

Příspěvek se zabývá současným stavem mobilní robotiky. Přináší přehled používaných přístupů a metod využívaných při řízení, mapování a lokalizaci robotu. Nastiňuje možnosti využití mobilních robotů v průmyslu i běžném životě člověka.

1. Úvod

Robot je obvykle elektromechanický stroj, který je schopen vnímat svoje okolí a toto okolí ovlivňovat. Mobilní robot je takový robot, který se dokáže přesunovat v prostoru. Mobilní robot může mít rozdílnou míru autonomie od teleoperovaného až po plně autonomního.

Teleoperovaný mobilní robot pouze vykonává příkazy lidského operátora. Robot může být ovládán úplně (podobně jako autíčko na vysílačku) nebo mohou být některé činnosti částečně autonomní. Takový robot bývá označován za semiautonomní. Plně autonomní robot je schopen činnosti zcela bez lidského zásahu případně je činnost lidského operátora omezena na zadávání cílů robotu, který sám volí nejlepší způsob dosažení zadaného cíle. Nadále budu pojmem mobilní robot rozumět plně autonomní mobilní robot. Tam, kde by hrozila záměna bude explicitně uvedeno, jakou míru autonomie robot má.

2. Kinematika

Mobilní robot (autonomní i teleoperovaný) může k přesunu využít různé kinematické modely pohybu v závislosti na prostředí, ve kterém se má pohybovat.

Pro pohyb na pevné zemi se nejčastěji používají kolové roboty. Kolo má oproti jiným způsobům pohybu jednoznačně nejlepší účinnost. Pro náročnější prostředí, se dá využít pásových robotů.

Kolové roboty můžeme dále dělit, podle uspořádání kol a jejich os na holomické a neholomické. Holonomický robot má říditelný stejný nebo větší počet stupňů volnosti než je celkový počet generalizovaných souřadnic nutných k popisu polohy robotu. Typickým příkladem neholonomického robotu je automobil, který není schopen kontrolovat pohyb ve směru kolmém na podélnou osu automobilu. Holonomický robot je vozík vybavený všesměrovými koly, který se může kontrolovaně pohybovat v libovolném směru stejně tak jako otáčet.

Kráčející roboty napodobují přírodu a snaží se pohybovat podobně, jako hmyz nebo savci tedy po dvou nebo více končetinách. Aby byl vůbec pohyb možný, je nutné, aby každá končetina disponovala alespoň dvěma stupni volnosti, (nejčastěji zvednutí a pootočení). Kráčející roboty mají teoreticky lepší prostupnost terénem.

U kráčejících robotů můžeme definovat dva typy pohybu: statickou chůzi a dynamickou chůzi. Při statické chůzi je robot v každém okamžiku ve statické pozici. To je obvyklý případ u čtyř a vícenohých robotů. Při dynamické chůzi se robot v některých fázích pohybu dostává

do nestabilní polohy, např. se nedotýká podložky vůbec. Příkladem takového pohybu je běh nebo skákání. Výhodou dynamické chůze je možnost dosažení vyšší rychlosti, než u chůze statické. Nevýhodou je řádově vyšší náročnost na řízení takového stroje a nemožnost zastavit pohyb v každém okamžiku pohybu.

Pro vzdušný prostor se využívají létající roboty. Nejčastěji se jedná o bezpilotní letouny (UAV). Ale i letadlo s pilotem se dá považovat za teleoperovaný robot. Často se využívají pro robotické účely helikoptéry, u kterých se s výhodou využívá jejich schopnost zůstat „na místě“. Využívají se také robotické vzducholodě, které umožňují výrazně snížit hluk při činnosti robotu.

Pro pohyb ve vodním prostředí se využívají nejčastěji robotické ponorky. Pohon v tomto případě obstarává lodní šroub. Zajímavou alternativou je pohyb robotu napodobující pohyb ryb. Jako hlavní motivace slouží výzkum ryb, kde robot napodobující rybí pohyb nenarušuje přirozené chování sledovaných ryb. Plánuje se i nasazení takovýchto robotů v rybolovu, kde robot putující s hejnem ryb předává svou polohu na rybářskou loď.

3. Řídící architektura

Mobilní roboty můžeme dále dělit podle řídicí architektury. Řídící architektura určuje jak robot plánuje své akce na základě vstupů. Těmito vstupy jsou zejména údaje ze senzorů zprostředkovávající informace o okolí i o vnitřních stavech robotu.

Reaktivní architektura

Reaktivní řídicí architektura je příkladem dekompozice zdola nahoru. Jsou definovány základní moduly robotu představující nejnižší chování robotu. Z těchto modulů jsou postupně (zespodu) sestavovány složitější struktury chování. Celý přístup je orientován na chování robotu (behavior based). Jednotlivé moduly mají přímý přístup k senzorickým datům a výsledné chování je dáno poskládáním výstupů modulů. Prostředí není vůbec nebo jen velmi hrubě modelováno. Prostředí samo o sobě slouží jako svůj model a jsou proto v nejvyšší možné míře využívána přímá senzorická data.

Paradigmatem reaktivní architektury je řetězec sense – act (vnímej a jednej). Typickým uspořádáním u reaktivní architektury je jeden senzor pro každé uvažované chování. Jako příklad uveďme úlohu sledování čáry. Pak můžeme říct, že jeden senzor barvy na levé straně robotu má na starosti zatáčení doleva a druhý senzor na pravé straně ovládá zatáčení doprava. Výsledné chování je dáno součtem těchto dvou vlivů.

Reaktivní architektura je výhodná zejména pro jednodušší úkoly. Její výhodou je vysoký stupeň robustnosti a necitlivosti na nepředpokládané změny prostředí. Svoji neocenitelnou roli hraje ve vysoce dynamickém prostředí. Jednotlivé moduly mají vysoký stupeň znovupoužitelnosti. Nevýhodou reaktivního přístupu je právě nepřítomnost modelu prostředí a tedy možnost uvážnutí v lokálním extrému řídicích funkcí. Na mnohé úlohy robotiky se reaktivní přístup vůbec nedá použít.

Funkční dekompozice

Funkční dekompozice je klasickým přístupem dekompozice shora dolů. Návrh postupuje postupným dělením složitější úlohy na jednodušší podúlohy. Jednotlivé moduly řešící rozložené podúlohy jsou řetězeny za sebe, kdy následující modul využívá výstupu předchozího. Výsledné akce ovlivňuje přímo pouze poslední modul v řetězci. Prostředí je modelováno na různých stupních abstrakce. Jednotlivé moduly tedy nepracují přímo se senzorickými daty, ale pracují s modelem, který vytváří předcházející moduly.

Paradigmatem funkční dekompozice je řetězec sense – plan – act (vnímej, plánuj a jednej). Pokud se přidržíme předchozího příkladu sledování čáry, pak robot nejprve pomocí senzorů, například kamery, vytvoří model světa (čáry). Na základě tohoto modelu vytvoří plán (časový průběh rychlostí koleček) a tento plán potom provádí.

Výhodou funkční dekompozice je schopnost řešit i ty nejkompexnější úlohy. K řešení je možné využít klasických algoritmů umělé inteligence, matematiky, teorie grafů apod. Nevýhodou je distribuce chyb. Chyba v jednom modulu ovlivní všechny následující moduly. Systém se také obvykle nedokáže přizpůsobit situacím, na které nebyl připraven.

Na jednoduchém příkladu sledování čáry můžeme částečně demonstrovat výhody a nevýhody obou přístupů. Jednoduchost úlohy ovšem zvyhodňuje reaktivní systém, neboť výhody funkční dekompozice se uplatňují zejména u složitějších úloh.

U reaktivního přístupu je robot schopen sledovat čáru po jakémkoliv povrchu, případná křižovatka nebude mít na jeho chování téměř žádný účinek, přestože v návrhu s existencí křižovatek nebylo počítáno. Na druhou stranu nemusí být schopen projet velmi ostré zatáčky a jeho pohyb určitě nebude optimální. Pokud bude čára přerušena, robot se ztratí.

Funkční dekompozice bude klást na povrch jisté požadavky (např. rovinnost) aby bylo možné vytvořit model. Pokud nebude při návrhu uvažována možnost výskytu křižovatek, mohou způsobit selhání systému. Na druhou stranu, je možné naplánovat globálně optimální trajektorii, která nemusí kopírovat čáru v místech, které jsou pro robot neprůjezdná. Díky modelu je možné rekonstruovat chybějící části čáry a sledovat její fiktivní polohu.

Odstranit nedostatky a využít předností obou se snaží hybridní architektura. Většina reálně používaných systémů využívá hybridní přístup. Při řešení složitých úloh je možné tyto úlohy dekomponovat a některé části řešit reaktivně zatímco jinde využít modelu prostředí.

4. Multirobotické systémy

Multirobotické systémy využívají součinnosti několika robotů k dosažení funkcionality přesahující schopnosti jediného robotu nebo tam, kde nasazení více robotů výrazně sníží časovou, energetickou nebo jinou náročnost úkolu. Komunikace, koordinace a kooperace jsou klíčové činnosti multirobotického systému.

Komunikace je nejčastěji realizována rádiovým spojením, ať už se jedná o technologii wi-fi, bluetooth, zigBee nebo proprietární rádiové spojení. Často se také používá optická komunikace (IrDA). Komunikace ovšem nemusí být explicitní a je možné použít i komunikaci založenou na modifikaci společného prostředí, nejčastěji použitím značek. Jako komunikaci můžeme využít i sledování chování ostatních členů týmu.

Koordinace je zajištění koherentního chování jednotlivců ve skupině. Cílem koordinace je zajistit, aby činnost jednoho člena týmu negativně neovlivnila činnost jiného člena. Typickým příkladem koordinovaného chování je pohyb ve formaci. K zajištění koordinace je nezbytně nutná nějaká forma komunikace nikoliv však nutně komunikace explicitní. Pro zajištění pohybu ve formaci stačí komunikace ve formě pozorování činnosti ostatních. Informace o pozici ostatních spolu s několika málo pravidly zajistí koordinované chování celé skupiny.

Kooperace je nejvyšší forma skupinového chování. Kooperace, tedy spolupráce, je činnost při které je také vyžadována komunikace. Při spolupráci je dosahováno takových cílů, k jejichž dosažení nestačí schopnosti jediného robotu. Takovou činností může být například spolupráce při přesunu velkého břemene, kterým jediný robot není schopen pohnout. V multirobotických systémech nemusí být kooperace přítomna.

K dosažení skupinového chování multirobotického systému jsou využívány dva základní přístupy centralizovaný a distribuovaný.

Centralizovaný přístup

Centralizovaný přístup je výhodný zejména při návrhu řešení. Existuje v něm jeden centrální prvek, který zajišťuje komunikaci, koordinaci a případně kooperaci a který má přístup k informacím od všech členů týmu. To je zároveň i nevýhoda centrálního přístupu. Tento centrální prvek je úzkým hrdlem celého systému. Pokud centrální prvek přestává fungovat nebo je jenom komunikačně nedostupný, přestávají fungovat všechny prvky systému.

Distribuovaný přístup

Distribuovaný přístup řešení problému rozprostírá na všechny členy týmu. V případě selhání libovolného prvku systému je zbytek systému schopen činnosti. Stejně tak přerušení komunikace nenarušuje činnost systému tak výrazně.

Multiagentní přístup je jedním z distribuovaných systémů řízení skupiny robotů. Rozdělování úkolů, koordinace a kooperace je řešena pomocí vyjednávání. Každý agent má své individuální cíle a schopnosti. Tyto schopnosti nabízí ostatním a naopak ostatní využívá k řešení svých individuálních cílů. Typickým mechanismem je aukce a vyjednávání.

Rojová robotika (swarm robotics) je distribuovaný přístup založený na interakci velkého množství velmi jednoduchých jedinců. Inspiraci čerpá u sociálního hmyzu jako jsou mravenci, termity vosy apod. Složitější chování vyvstává z interakce mezi jedinci (emergence behavior). Velmi často je využívá nepřímé komunikace prostřednictvím modifikace prostředí. Prostředí se v takovém případě stává nedílnou součástí řídicího procesu.

Hybridní týmy

Zajímavou oblastí mobilní robotiky jsou hybridní týmy. Členové týmu jsou mobilní roboty spolu s lidmi. Metody řízení takového týmu se výrazně liší od řízení čistě robotického týmu. Výzvou v hybridním týmu je zejména sdílení znalostí mezi lidmi a stroji. Jak zprostředkovat informace robotům lidem a opačně. Lidé a roboty potřebují odlišnou reprezentaci znalostí k tomu, aby s nimi byli schopni pracovat.

Při převádění informací od robotů lidem se spolupracuje i s psychology aby bylo dosaženo optimálního předávání informací. Informace je třeba filtrovat a uspořádat tak, aby člověk byl schopen přijmout a zpracovat co možná nejvíc relevantních informací s co možná nejmenší zátěží.

Obrácený postup je stejně náročný. Člověk musí být schopen předávat své znalosti a informace robotům. Opět je třeba navrhnout způsob předávání informací tak, aby lidem připadal jednoduchý a pohodlný.

Problematiku hybridních týmů a řešení jednotlivých úloh ověřoval evropský projekt *PeLoTe – Building Presence Through Hybrid Telematic System* na jehož řešení se významně podílela i Katedra kybernetiky ČVUT.

5. Lokalizace

Každý mobilní robot řeší základní otázky, „Kde jsem?“, „Kam se chci dostat?“ a „Jak se tam dostanu?“. Aby byl robot schopen si odpovědět na tyto otázky musí být schopen vnímat svoje prostředí, lokalizovat se v něm a naplánovat cestu.

Nejjednodušší metodou lokalizace je lokalizace na základě informací o změnách vnitřního stavu robotu (dead reckoning). Nejrozšířenější je určování polohy robotu z odometrie, tedy integrace polohy na základě otáčení kol robotu. všechny metody založené na dead reckoning jsou zatíženy kumulativní chybou. Malé chyby v senzorických datech se časem sčítají až dosáhnou takové hodnoty, že je výsledná poloha nepoužitelná. Přesto se tato lokalizace používá často, avšak většinou jako součást složitější lokalizace a informace jsou skládány s dalšími informacemi od jiných senzorů.

Další možnou metodou je lokalizace využívající aktivních prvků (majáků) dodaných do prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Taková lokalizace je i lokalizace prostřednictvím GPS, která využívá družic rozmístěných na oběžné dráze. Ve vnitřních prostorech se využívá majáků vysílajících ultrazvukové nebo světelné signály. Poloha robotu je určena vzhledem k jednotlivým majákům a není třeba mít mapu prostředí.

Lokalizace může probíhat vůči existující mapě prostředí. Protože mapu obvykle nemáme k dispozici, řeší se problém současné lokalizace a mapování (SLAM). V tomto případě se inkrementálně rozšiřuje známá mapa a robot se lokalizuje vůči této částečné mapě. Při SLAMu se často využívá toho, že změna polohy robotu je malá mezi jednotlivými kroky rozšiřování mapy.

Pokud máme známou mapu prostředí a nevíme počáteční polohu robotu, pak můžeme využít metod lokalizace sledujícími více hypotéz o poloze robotu (např. metoda monte carlo). Metoda je založena na výpočtu rozložení pravděpodobnosti výskytu robotu, podmíněné danými senzorickými daty. Na začátku je pravděpodobnost výskytu robotu stejná ve všech místech prostoru. Čím déle se robot pohybuje prostředím, tím více se profiluje místo s nejvyšší pravděpodobností.

6. Mapy

Mapa je vnitřní model prostředí, který robot používá k plánování a lokalizaci. Mapa může být zadána z vnějšku nebo si ji robot autonomně buduje během svého pohybu v prostředí. Druhá varianta je výrazně častější neboť mapy ve vhodném formátu nebývají k dispozici a téměř nikdy neodpovídají aktuálnímu stavu prostředí. Mapy lze dělit do tří skupin: senzorická mapa, geometrická mapa a topologická mapa.

Senzorická mapa

Senzorická mapa je nejnižší možná reprezentace prostředí. Jedná se pouze o vhodně reprezentovaná a uchovaná senzorická data. Takovou senzorickou mapou je například mřížka obsazenosti. Prostředí je rozděleno na dílky uspořádané do mřížky. Každá buňka mřížky v sobě uchovává pravděpodobnost, že je prostor obsazený nějakou překážkou nebo je volný. Výhodou je snadná tvorba a možnost fúze dat přímo při tvorbě mapy. Nevýhodou je paměťová náročnost reprezentace. Navíc nemusí být taková reprezentace příliš vhodná pro další zpracování jako je plánování trasy.

Geometrická mapa

Geometrická mapa reprezentuje prostředí geometrickými primitivami, jako jsou přímky, polygony, kružnice apod. Takto vystavěná mapa má určitou míru abstrakce. Abstrahuje model od přílišných detailů. Tvorba takové mapy je už výpočetně náročnější, neboť je třeba najít takové geometrické primitivum, které nejlépe modeluje naměřená data. Je ovšem přívětivější pro další práci a pro plánování trajektorie. Také díky abstrakci není tak náročná na paměťový prostor.

Topologická mapa

Topologická mapa je ještě abstraktnější model prostředí než geometrická mapa. Prostor je modelováno grafem, ve kterém uzly reprezentují jednotlivá místa, která jsou pro robot nějakým způsobem význačná či zajímavá. Hrany uzlu reprezentují způsob, jak se robot přemístí z jednoho místa do druhého. Topologické mapy nemusí obsahovat žádnou geometrickou informaci. Typickou ukázkou topologické mapy je mapa linek pražského metra. Stavba takové mapy klade vysoké nároky na zpracování senzorických dat, ve kterých je nutné rozpoznat význačná místa. Pro plánování je možné použít symbolické metody plánování nebo algoritmy z teorie grafů.

7. Aplikace

Nejvíce aplikací mobilních robotů nacházíme v průmyslovém, výzkumném a armádním prostředí. všechny tyto prostředí mají společnou vlastnost, že se v něm nepohybují osoby nepoučené o možnostech daného robotu. To snižuje nároky na použitého robota, který není nucen se vyrovnat s nepředvídatelným chováním lidí.

V průmyslu se mobilní roboty nasazují ve výrobních halách k dopravě materiálu. Můžeme najít automatické sklady, kde mobilní roboty optimalizují umístění jednotlivých položek, automatizovaný rozvoz materiálu k obráběcím strojům apod. Častým důvodem nasazení mobilních robotů je prostředí nebezpečné nebo nevhodné pro člověka, jako jsou provozy s vysokou hladinou hluku, vysokou teplotou, nebezpečnými plyny apod.

Automobilový průmysl využívá značné množství robotických přístupů při vývoji různých asistenčních zařízení usnadňující řidiči řízení. GPS navigace, udržování odstupu od předchozího automobilu, sledování krajnice. Všechny tyto zařízení sledují trend vývoje autonomního automobilu. Paradoxně je pro autonomní automobil největší problém člověk. Nepředvídatelné reakce ostatních řidičů a chodců vytvářejí z projektu autonomního automobilu náročnou výzvu.

Armádní prostředí také nahrává mobilním robotům. Bezpilotní letouny schopné plnit úkoly v autonomním nebo teleoperovaném režimu. Mobilní roboty se používají k odstranění námořních i pozemních min, k průzkumu nebezpečných oblastí. Mobilní roboty Sherpa se používají k nošení břemen těžko prostupným terénem. Tento kráčející robot sleduje vojáka stejně jako pes.

Automatické řízení aut v zásobovací koloně přispívá k bezpečnosti vojáků. Stačí řídit první vůz kolony, a ostatní následují autonomně.

Výzkumné prostředí využívá mobilní roboty všude, kam se nemůže dostat člověk. Mobilní roboty prozkoumávají hlubiny oceánu stejně jako hlubiny vesmíru. Dálkově řízené ponorky pomáhají v průzkumu vraků (natáčeli i film Titanik), hlubokomořských příkopů, pomáhají sledovat chování mořských živočichů bez ovlivnění přítomností člověka.

Při průzkumu Marsu se také využívalo mobilního robotu. Vzhledem k časovému zpoždění rádiového signálu musel být robot vybaven velkou mírou autonomie. Vědci zadávali cíle, které je zajímaly, ale robot sám vybíral nejlepší cestu k dosažení cíle.

Do vědeckého oboru také můžeme zařadit soutěže jako je Grand Challenge nebo robotická kopaná. Takové soutěže pomáhají urychlovat vývoj robotické vědy. A nejedná se jen o takto velké soutěže. Zajímavé jsou i soutěže méně nákladné, zejména v kontextu výuky. Takovou soutěží je jistě Eurobot. Každoroční změna pravidel umožňuje rovnocenné zapojení nových týmů, dobře definované prostředí zjednodušuje řešení.

Nezapomínejme ani na využití mobilních robotů v záchranných akcích. Teleoperované roboty se využívají při zneškodnění náloží. Podobně se využívají roboty při prohledávání trosek a vyhledávání obětí.

Velký potenciál má také vývoj robotů pro zábavu. Robotický pes Aibo nebo Robotsapien jsou prvními pokusy o roboty pro zábavu. Z takových robotů se můžou vyvinout robotičtí společníci, ošetřovatelky, zdravotní sestry. Také připravují laickou veřejnost na přítomnost robotů v běžném životě.

Literatura

- [1] V. Mařík, O. Štěpánková, J. Lažanský a kol.: Umělá Inteligence (5). Academia, Praha, in press
- [2] V. Mařík a kol.: Umělá Inteligence (1-4), Academia, Praha, 1993-2003
- [3] D. Kortenkamp, R. Bonasso, R. Murphy: Artificial Intelligence and Mobile Robots, AAAI Press/ The MIT Press, 1998
- [4] R. Siegwart, I. Nourbakhsh: Introduction to Autonomous Mobile Robots, The MIT Press, 2004
- [5] M. Havel, *Robotika - Úvod do teorie kognitivních robotů* . SNTL, Praha 1980.
- [6] Projekt PeLoTe IST-2001-3887 [on-line], URL < <http://labe.felk.cvut.cz/~pelote/> >
- [7] [Eurobot \[on-line\]](http://www.eurobot.org/), URL <<http://www.eurobot.org/>>