

Mobilní robotika

Senzory a Plánování

RNDr. Petr Štěpán, Ph.D.
stepan@labe.felk.cvut.cz

Skupina mobilní robotiky
Gerstnerova laboratoř
katedra Kybernetiky
České vysoké učení technické v Praze

Modely prostředí 11. října 2011

Obsah

1 Senzory

- Senzory polohy
- Dálkoměrné senzory
- Satelitní navigace

2 Plánování

- Konfigurační prostor
- Metoda cest
- Potenciální pole

Senzory

Senzory slouží jako zdroj dat pro chování robotu - pro lokalizaci v prostředí, pro navigaci a plánování a pro rekonstrukci prostředí.

Rozdělení senzorů:

- aktivní - k provedení měření potřebují vyslat energii a detekovat její návrat (radar, sonar, lidar, IR senzor přiblížení)
- pasivní - opírají se o vhodnou fyzikální vlastnost prostředí (kamera, kompas, akcelerometr)
- lokální
- distribuované (GPS - družice jsou součástí senzoru)

Senzory pro určení polohy

Určení polohy metodou dead Reckoning - počítání ujeté vzdálenosti.

- založeno na měření otáček kol (pásů) robotu
- nejčastěji optické enkodéry - IRC čidla, nízká cena, nutnost přímého zpracování, počítání pulsů
- indukční snímače - spojitě snímání úhlu rotace v rozsahu $0 - 2\pi$, přesné ale drahé
- optické korelační odometry - optická myš, korelace dvou blízkých obrazů, rychlá odezva a nízká cena, problémy se zaostřením - malý dosah

Senzory pro určení pohybu

Měření rychlosti pohybu vůči povrchu na základě dopplerovského posunu vysílaného signálu.

- často mikrovlnná oblast - 10GHz - 54GHz
- velký rozsah rychlostí, přesné, chyba řádově 1%
- robustní řešení, nevyžaduje viditelnost
- velká cena, systematické chyby způsobené vedlejšími laloky zářiče - registrace objektů mimo osu pohybu
- lze i ultrazvuk, ale více problémů

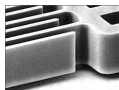
Senzory směru

Měření směru polohy robota má velký vliv z hlediska vzniku kumulativní chyby

- mechanický gyroskop - rotující setrvačnick
- 2 třídy - měření úhlové rychlosti nebo úhlové odchylky (integrující gyroskopy)
- velká přesnost - letecké gyroskopy $0.1^\circ/6hod$
- velká cena, proto se nahrazují gyroskopy solid-state (v pevné fázi) bez rotujících částí

Senzory směru

Micro Electro-Mechanical System - MEMS



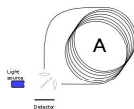
- litograficky vytvořená pohyblivá část je udržována v elektromagnetickém poli a jsou detekovány síly, které na ní působí.
- pro úhlovou odchylku nutno integrovat - zvyšování chyby
- nízká cena, princip modelářských gyroskopů

MEMS

Senzory směru

Optické gyroskopy FOG - fibre optic gyroscope:

- založeno na relativistickém principu změny vlnové délky v kruhovém světlovodu - Sognacův jev, monochromatické laserové světlo
- dlouhé optické vlákno smotané v jednom směru pro přesnou detekci změny uhlové rychlosti
- vysoká přesnost 10^{-6} rad/sec
- vysoká cena



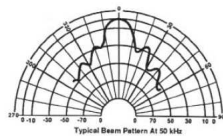
Optický gyroskop

Dálkoměrné senzory

- sonar
- laser
- optorezistivní snímače
- PMD kamera, Swissranger

Sonar

- Princip založen na měření doby letu ultrazvukového akustického pulsu.
- Typický dosah $0.2m \sim 20m$.
- Přesnost $\pm 4cm$
- Systematická chyba závislosti na teplotě a vlhkosti. Pro suchý vzduch lze rychlost určit jako $331.4 + 0.6T_c m/s$, kde T_c je teplota v $^{\circ}C$. Při teplotě $22^{\circ}C$ je změna $1^{\circ}C$ rovna chybě 0.4% .
- Obtížné zaostření vyzařovacího diagramu - boční odrazy a přeslechy
- Odraz zvukové vlny mimo detekci senzoru

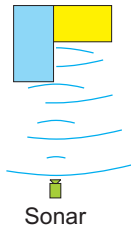


Note: dB normalized to on-axis response.
Note: Curves are representative only. Individual responses may differ.

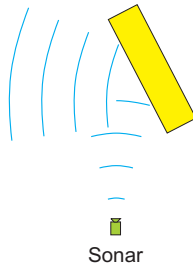
Sonar



Modrá překážka pohlcuje
ultrazvuk, žlutá překážka jej
odráží

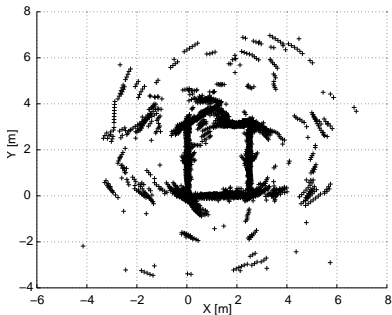


Překážka ultrazvuk odraží, ale
nerozptyluje.

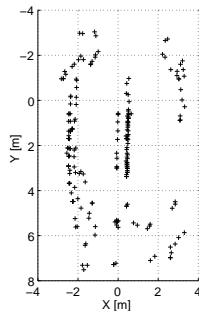


Velký význam statistické zpracování dat ze sonaru.

Sonarová data - příklady



Komplikované odrazivé prostředí



Příklad chodby

Laser - LIDAR

- obdobný princip jako sonar - měření doby letu IR laserového pulsu
- velmi úzký měřicí paprsek, jediný problém velmi hladké zrcadlo, nebo čiré sklo
- jednotlivá měření se již většinou HW průměrují - neočekávané data na hranách
- měří většinou pouze ve 2D, 3D provedení - naklápění celého zařízení - zdlouhavé
- dosah $0.05m \sim 60m$, přesnost $1cm/0.1cm$, rozlišení $0.5^\circ - 5^\circ$
- nevýhody - velká cena, pouze 2D

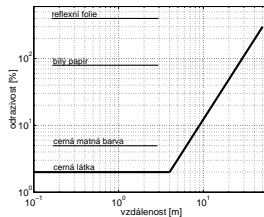
Laser



Malý laserový
hloubkoměr firmy
Hokuyo. Malý dosah
max. 6m



Sick PLS 200



Závislost minimální
odrazivosti předmětu
na měřené vzdálenosti
pro Sick LMS 200.

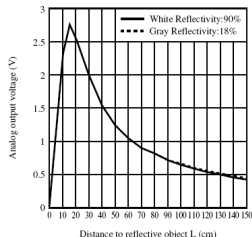
Optorezistivní čidla

Firma Sharp vyrábí čidla pro detekci vzdálenosti GP2D12 (10-80cm) a GP2Y0A02YK (20-150cm).

- jednoduché levné čidlo, pracuje v IR oblasti, úzký paprsek
- princip triangulace pomocí optorezistivního senzoru



Série Sharp senzorů



Závislost napětí na vzdálenosti.

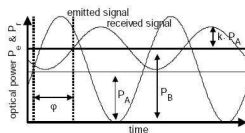
Swiss Ranger SR 3000

Senzor pro měření vzdálenosti v 3D. Detekce fázového posunu vysílaného a přijímaného signálu v každém pixelu kamery.

- hloubková mapa a jasová IR informace v každém pixelu 176×144
- dosah 7.5m, rychlé snímání 20 – 50Hz, problém šumu a odrazů



SwissRanger SR3000

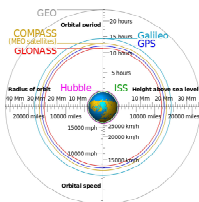


Průběh I/O signálů

GPS, Glonass, Galileo, Compass, Beidou, IRNSS, QZSS

Detekce polohy na povrchu země podle přijatých signálů z družic.

- GPS - 24 satelitů armády USA. Plně funkční od roku 1994.



- Glonass - ruský armádní systém, po roce 2000 doděláván, nové verze
- Galileo - plánovaný satelitní navigační systém EU s centrem v Praze
- Compass, Beidou - čínské systémy ve vývoji
- IRNSS - indický systém s pokrytím pouze pro Indii.
- QZSS - japonský systém pouze pro okolí Japonska

Satelitní navigace

- Každá družice má přesné hodiny, které jsou kontrolovány ze Země.
- GPS přijímač obsahuje také co nejpřesnější hodiny, podle kterých se snaží zjistit rozíly doby letu signálu od družice k přijímači.
- Protože hodiny v GPS přijímači jsou výrazně nepřesnější, je nutné pro výpočet polohy uvažovat 4 neznámé (x, y, z, t).
- Systém rovnic je přeuročený a jde o to nalézt nejlepší výsledek numerickými metodami.
- Přesnost polohy závisí na mnoho podmínkách, přesnost hodin, atmosférické vlivy, příjem odražených signálů, počet viditelných družic.
- Vlivy atmosféry lze odstranit použitím diferenciální GPS, kdy jedno stanoviště je přesně lokalizované a generuje koreční

Plánování

Plánování obecně je o nalezení posloupnosti akcí, které převedou robot z počátečního stavu do koncového stavu.

Pro plánování se nejvíce využívá algoritmus prohledávání do šířky, do hloubky a různé druhy informovaného prohledávání A^* .

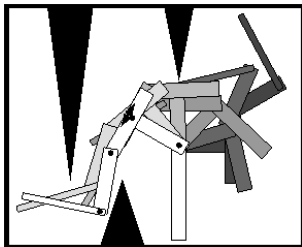
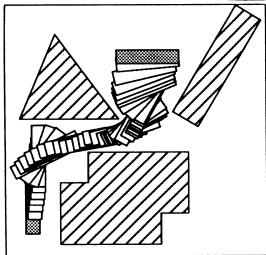
Největším problémem je velikost stavového prostoru, kdy je prohledávání časově a paměťově náročné. Hlavním cílem je zjednodušit stavový prostor či omezit prohledávání stavového prostoru na spočitatelnou úroveň.

Konfigurační prostor

Konfigurační prostor

Proč konfigurační prostor

Roboty mají různé tvary a různou kynematiku. Manipulátory, kolové roboty, kráčející roboty se liší způsoby pohybu. Obecně je složité definovat co je cesta pro robot.



Co je to konfigurační prostor

Robot zredukujeme na bod, který představuje konfiguraci robotu v prostoru.

Množina všech možných konfigurací (**bodů**) představuje konfigurační prostor (stavový prostor).

Cesta (**křivka v prostoru**) pro robot je pak souvislá posloupnost konfigurací (**bodů**) robot od počáteční konfigurace (**startovní bod**) do cílové konfigurace (**cílový bod**).

Překážka představuje zakázané konfigurace (**body**), kdy robot je v konfliktu s překážkou.

Konfigurace robotu

Konfigurace jednoznačně definuje polohu robotu vzhledem k pevné souřadné soustavě.

Příklady:

x, y - válcový robot pohybující se v rovině - 2 DOF

x, y, α - robot auto, navigace - 3 DOF

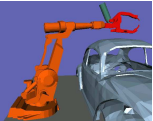
x, y, α, β - traktor s valníkem - 4 DOF

$x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ létající robot - vrtulník stíhačka, raketoplán 6 DOF

α, β manipulátor se dvěma klouby - 2 DOF

Konfigurace robotu

Další příklady:



6 DOF



12 DOF



40 DOF



65-120 DOF

Konfigurační prostor

Konfigurační prostor je prostor všech konfigurací. Jak takový konfigurační prostor vypadá?

Jedná se o lokálně euklidovský prostor. Okolí každého bodu se chová euklidovsky, to znamená lze ho zobrazit na euklidovský prostor - přímku, rovinu, 3d prostor, atd..

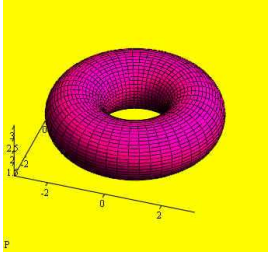
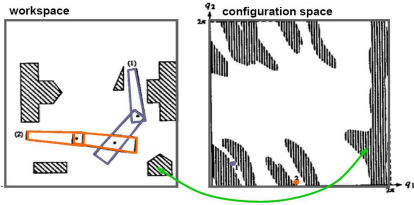
Prostorové souřadnice jsou většinou neomezené od $-\infty$ do ∞ .

Rotační souřadnice jsou většinou omezené od $-II$ do II a navazují na sebe $k(-II) = k(II)$, neboli jsou do sebe uzavřené.

Konfigurační prostor

Příklad:

Mějme manipulátor se dvěma klouby a dvěma rameny. Jeho poloha je jednoznačně určena dvěma úhly. Konfigurační prostor je anuloid.

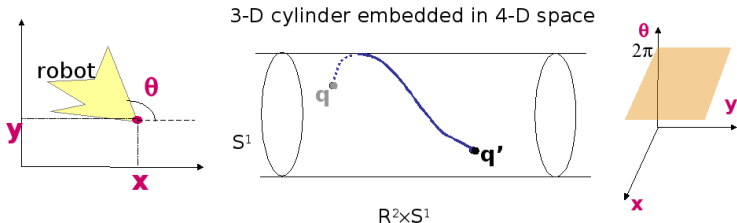


Konfigurační prostor

Příklad:

Robot- auto pohybující se v rovině. Jeho poloha je jednoznačně určena dvěma kartézskými souřadnicemi a jedním úhlem.

Konfigurační prostor je tří rozměrný válec stočený ve 4-tém rozměru (dost špatně se to představuje, asi jako kdyby v každém bodu roviny byla namalována kružnice kolmo k rovině a ty kružnice by byly k sobě souvisle slepeny v obou osách).



Překážka

Překážka je množina konfigurací (bodů) ve kterých se robot nemůže nacházet, protože by byl v kolizi s reálnou překážkou.

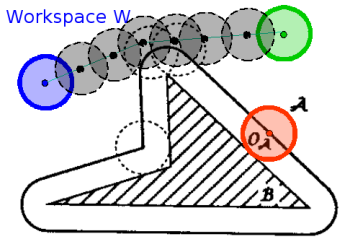
Volný prostor je množina všech konfigurací, ve kterých se robot může nacházet, aniž by byl v kolizi s překážkou.

Volný prostor = Konfigurační prostor - překážky

Jak zjistit překážky?

Překážka u kulového robotu bez orientace

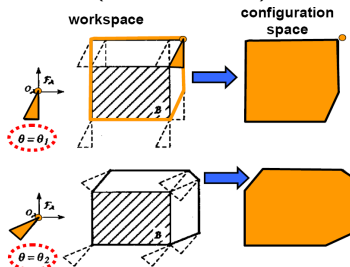
Překážky se vytvoří “nafouknutím” překážek o poloměr robotu.



Překážka u robota s orientací

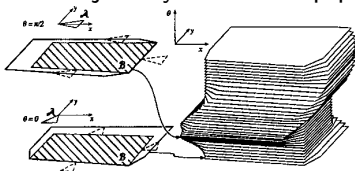
Nutno diskretizovat orientaci robotu (např. po 20°).

Pro každou orientaci robotu doataneme speciální 2D mapu, kde jsou překážky zvětšeny o tvar robotu v dané orientaci.



Překážka u robota s orientací

Výsledkem je tedy soubor map pro různé orientace robota.



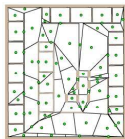
Plánování na konfiguračním prostoru

Plánovací metody závisejí na velikosti konfiguračního prostoru:

- dekompozice prostoru a A^*
- metoda cest
- potenciálové pole - vhodné i pro velké DOF (10), nutno řešit problémy s lokálními minimem
- pravděpodobnostní metody - RRT, RDT

Dekompozice prostoru

- rozdělení konfiguračního prostoru podle zvoleného pravidla (triangulace, konvexní oblasti, lichoběžníky)
- vytvoření grafu sousednosti jednotlivých částí prostoru, tím se silně zredukuje velikost prohledávaného prostoru
- plánování je nalezení cesty v grafu sousedností
- bohužel vytvoření dekompozice je pro velké prostory s hodně DOF



Metoda cest

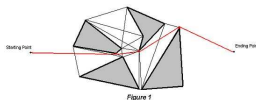
Metodu cest můžeme přirovnat k navigacím do automobilů. Místo aby navigace používaly pro plánování cesty informace o tom, že jedete lesem, nebo kolem rybníka, jediné co vás zajímá je systém cest a křižovatek.

Pokud robot není na počátku na “silnici“, musí se nejdříve dostat na nejbližší silnici (nějakou jinou metodou), a pak jede po silnici až k bodu, který je nejbliže cíli a dále sjede ze silnice a jinou metodou se dostane do cíle. Pokud máte vhodně navrženou síť silnic jsou první a poslední fáze velmi jednoduché a lze použít jednoduché algoritmy (jed' rovně až na silnici).

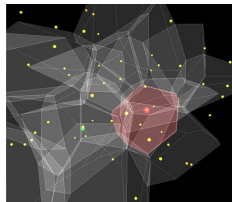
Metoda cest

Pro vytváření cest se nejčastěji používá:

- Voronoi diagramy, skelety - plánuje dále od překážek, někdy i nevhodně daleko
- triangulace
- graf viditelnosti, jednoduše $O(n^3)$, lze také $O(n^2)$
- lichoběžníková dekompozice



Graf viditelnosti



Voronoi graf v 3D

Metoda cest

Pro plánování lze použít metodu A^* , odhad cesty do cíle jako Euklidovská vzdálenost do cíle.

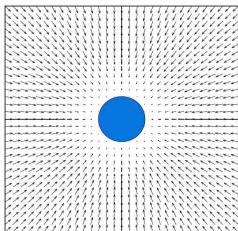
Plánování s různými omezeními (rychlosti na různých cestách - silnicích). Pro korektní chování algoritmu A^* je pouze nutné použít odhad, který je menší než reálná nejkratší cesta (odhad 0 způsobuje prohledávání do šířky a je korektní).

Potenciální pole

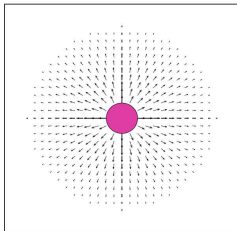
Potenciální pole

Potenciální pole

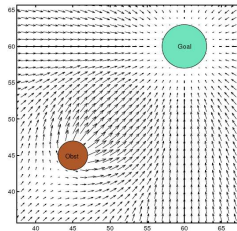
Vytvoření vektorového pole virtuálních sil. Síly jsou definovány tak, aby robot byl přitahován k cíli a odpuzován od překážek.



Přitahování k cíli



Síla od překážek



Kombinace obou sil

Potenciální pole

Příklad definice sil.

Přitažlivá síla: $U_{att} = \frac{1}{2}\xi\|q - q_{goal}\|^2$, kde ξ je měřítko a $\|q - q_{goal}\|^2$ je Euklidovská vzdálenost bodu od cíle.

Odpudivá síla: $U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 & ; \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & ; jinde \end{cases}$,

kde $\rho(q)$ je minimální vzdálenost k překážce a ρ_0 je vzdálenost vlivu překážek.

Potenciální pole

Výhody - jednoduchý na výpočet

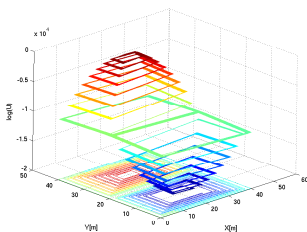
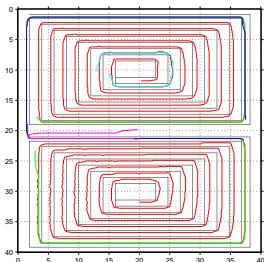
Nevýhody - uváznutí v lokálním minimu.

Řešení uváznutí je složité:

- Metody simulovaného žíhání (snaha přeskočit kopec), vrátím se a zkouším cestu, která jde do kopce.
- Výpočet potenciálu podle kostry, nebo voronoiho grafu
- harmonický potenciál

Harmonické potenciální pole

Harmonické potenciální pole navíc splňuje $\nabla^2 U(q) = 0$. Pro plánování je omezeno okrajovými podmínkami, v cíli $U(cil) = 1$, na okraji překážek je $U_{\partial\Omega} = 0$, kde množina Ω reprezentuje překážky. Výhody - nemá lokální minimum (pouze v cíli), ale je složité ho spočítat. Počítá se iterativně na diskretizovaném prostoru.



Rapidly-exploring Random Tree - RRT

Pravděpodobnostní plánovací algoritmus, řeší problémy deterministických algoritmů na velmi velkých úlohách (velikost úlohy závisí jednak na velikosti prostoru, jenak na počtu dimenzí). Algoritmus se snaží vytvořit strom, který vede od startovní pozice do cílové pozice, případně rovnoměrně pokrývá konfigurační prostor.

Uzly stromu jsou konfigurace, hrany stromu jsou přechody mezi konfiguracemi, které lze jednoduše vyřešit (robot jede rovně 20cm, robot jede po kružnici o poloměru 2m vzdálenost 20cm, apod.)

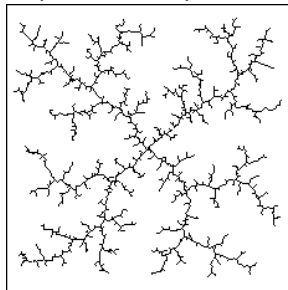
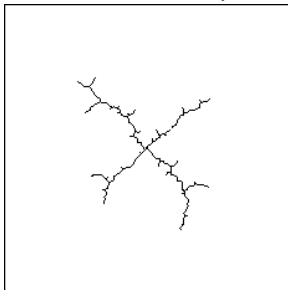
RRT - algoritmus

Nejjednodušší RRT algoritmus:

- 1** Inicializace stromu G na startovní konfiguraci a žádné hrany
- 2** pro $k = 1..K$ opakuj:
 - 1** náhodně vyber bod q v konfiguračním prostoru
 - 2** vyber uzel q_b ze stromu G , který je nejbližší k q
 - 3** vyber akci, která převede konfiguraci q_b na q_n tak, aby q_n bylo co nejbližší q
 - 4** přidej q_n do G a přidej hranu z q_b do q_n do G

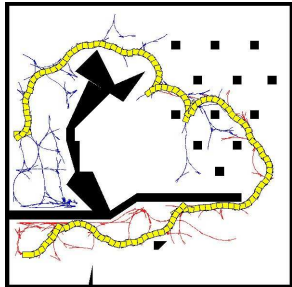
RRT - příklady

Příklad růstu stromu pro konfigurační prostor bez překážek.

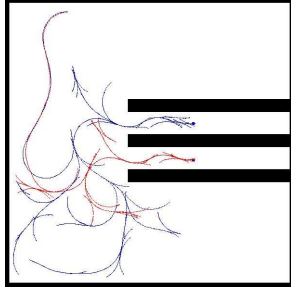


RRT - příklady

Pro růst stromů lze definovat nejrůznější kynematická omezení:



auto

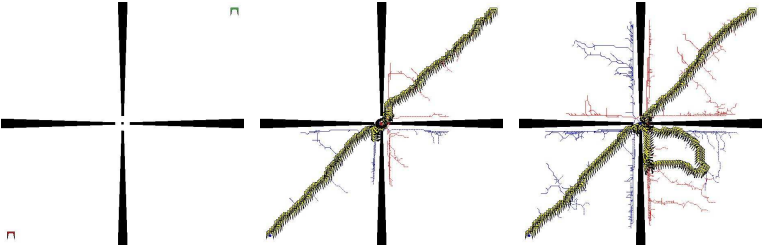


traktor se třemi valníky

RRT - příklady

Problémy metody RRT:

1. špatně zvládá úzké průchody v jinak velickém světě.



RRT - příklady

Problémy metody RRT:

2. nedeterminičnost ukončení výpočtu
3. nenalezení cesty i když existuje
4. často nutná optimalizace hladkosti trajektorie

Obecný konfigurační prostor

Do konfigurace robotu můžete přidat i rychlost, případně zrychlení a kynematická omezení.

Rozšíří se vám tím počet dimenzí, takže si již těžko budete moci něco představit, ale umožní vám to řešit spoustu komplikovaných úloh.