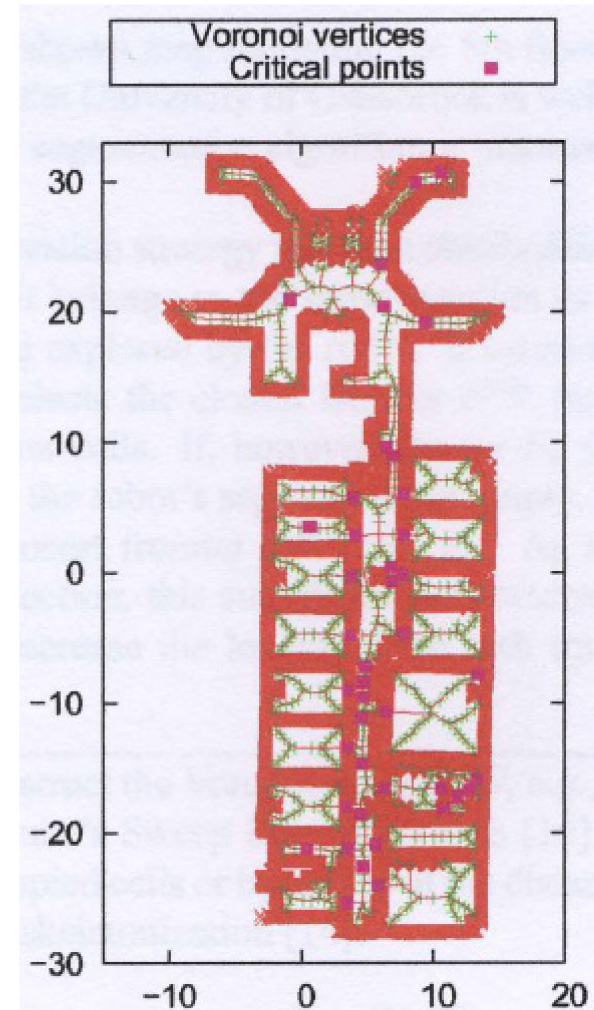


Autonomní explorace - obsah

- Úloha explorace a mapování prostředí, motivace a základní přístupy
- Frontier-based explorace a její vlastnosti
- Příklady řešení (videa)
- Možná vylepšení frontier-based postupu
- Reference



Autonomní explorace a mapování

Úloha: Orientovaný/systematický pohyb robotu v prostředí

- De facto realizace úlohy SLAMu, kombinací prohlídky a mapování prostředí

Výchozí informace:

- Senzorická měření reality (dálkoměry, odometrie, kamera, poloha a orientace...)
- Znalost o geometrii prostředí – mapa/model prostředí znám jen do určité míry

Mezní případy tedy:

- Model prostředí je předem znám → úloha plánování, lokalizace a navigace ve známé mapě
- Model prostředí je neznámý (popř. odlišný od skutečnosti) → *úloha explorace*, lokalizace a navigace
- Autonomní explorace je postup, který zajišťuje pohyb v neznámém prostředí při současném vytváření jeho modelu/mapy (jenž je využita následně k další navigaci). Proces realizuje úlohy:
 - Lokální volbu jednotlivého podcíle k rozšíření znalosti o tvaru a struktuře prostředí
 - Globální rozhodování o řazení podcílů k rekonstrukci celého modelu prostředí.

Tedy řeší otázku:

??? Kam navigovat při jisté lokální (limitované) znalosti o struktuře a tvaru prostředí tak, aby byl maximalizován informační zisk z realizace takové akce.

Autonomní explorace a mapování – motivace



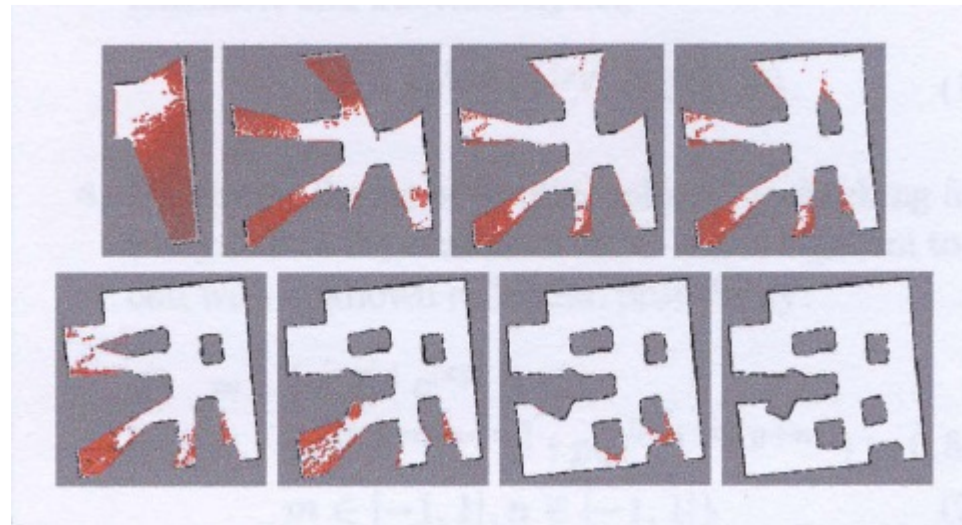
Autonomní explorace a mapování – problémy

- Snadné řešení v geometricky jednoduchých prostředích (polygonální, konvexní..) splňujících mnohé omezující podmínky (např., popř. stěny objektů jsou vzájemně pravouhle orientovány, bez existence dalších překážek a viditelné, atd.) - exploraci je možné provést např. sledováním hranice objektů
- Předchozí omezení reálná prostředí nespĺňují, a proto hrozí uvíznutí exploračního algoritmu (úzké průchody a členité hranice objektů při limitované manévrovatelnosti robotu)

- Existující problémy lze obejít užitím tzv. **frontier-based** postupu:

Def.: Frontier je oblast prostředí, na hranici mezi již známým volným prostorem a neznámou oblastí prostředí.

Použití frontieru jako lokálního dočasného cíle k navigaci umožňuje řídit exploraci dosud neznámých oblastí prostředí



Vznik frontieru při reálné exploraci

Frontier-based explorace – situace

- Robot nemá žádnou jinou další znalost o prostředí, než tu, jenž je schopen odvodit z počáteční pozorovací pozice (inicializace exploračního postupu)
- Princiální úvahy:
 - Ke každému dosažitelnému bodu prostředí robotu existuje aspoň jedna cesta z aktuální pozice robotu, jenž je jistě dosažitelná (existence).
 - Pokud se dosažitelný bod prostředí nachází v dosud nezamapované oblasti, existuje jistě cesta, která spojuje aktuální (dosažitelnou) pozici robotu s tímto dosažitelným bodem a prochází frontierem (vlastnost).
 - Pokud robot nerealizuje v jednom okamžiku všechny části zvolené cesty vedoucích k dostupnému bodu, frontier(y) podél této cesty zůstávají dále zachovány - posunou se dále podél trajektorie (a určují další oblast k exploraci).

... Volba **heuristiky k provádění explorace** tak, že robot se systematicky pohybuje směrem ke hranici (frontieru) mezi již zmapovaným a neznámým prostorem.

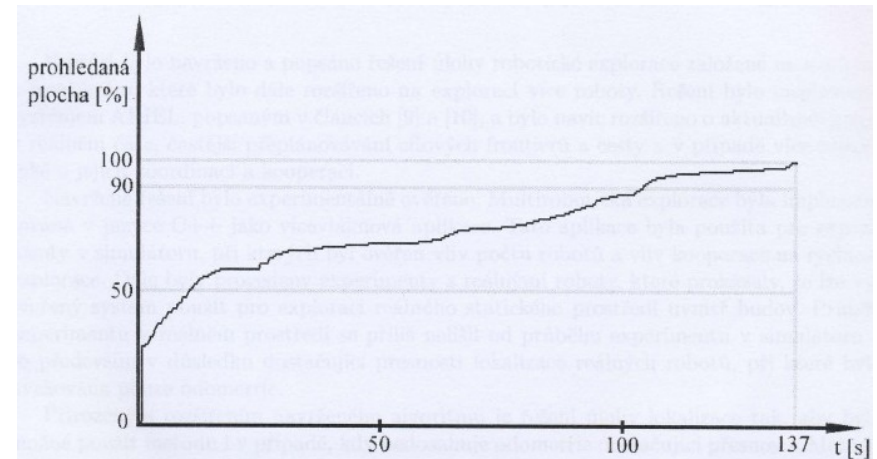
- snahou o dosažení frontieru získává další senzorká data z dosud neviditelné oblasti (informační zisk)
- aktuální frontier se dále posunuje do neznámého prostředí, pokud existuje (pokrytí celého prostoru)

Frontier-based explorace – vlastnosti a komponenty

- Přírůstek informace nově zmapovaných oblastí klesá geometricky s délkou/dobou trvání explorace (tj. teoreticky, čas potřebný k úplnému zmapování dané oblasti může být $\rightarrow \infty$) - tj. vykazuje chování tzv. „Zeno systému“ (systém, který má nekonečně mnoho kroků v konečném čase)
- Vzhledem k diskretizaci (segmentaci) mapovaného prostoru na kompaktní volné oblasti jsou reálné úlohy obvykle řešeny s přijatelnou přesností v konečném čase.

Komponenty:

- Zdroj vstupních dat (dálkoměrný senzor)
- Model prostředí (pravděpodobnostní mřížka)
- Detektor frontierů (klasifikátor vlastností pixelů modelu)
- Navigátor a scheduler frontierů



Příklad informačního zisku explorace v čase

- velmi jednoduchá implementace...

Frontier-based explorace – vstupní zdroj dat a model prostředí

- Dálkoměrný sensor LIDAR, slouží k výstavbě pravděpodobstního modelu prostředí – mřížky (viz předchozí přednášky)
 - Ke zlepšení chování je v reálných úlohách častá i kombinace SONARu s LIDARem) – sonar poskytuje nespolehlivá data (spekulární a násobné odrazy, fantomové odrazy) → generuje falešné neexistující fronty → snižuje efektivitu reálného exploračního postupu
 - Odlišný fyzikální princip použitých senzorů
 - Kombinování (fúzi) dálkoměrných senzorů lze povádět algoritmem, jenž verifikuje sonarová měření jiným senzorem (i.e. LIDAR-limited SONAR) a to:
 - Je-li hodnota vzdálenosti k překážce naměřená sonarem větší než lidarem, uvažujeme hodnotu dodanou lidarem. V případě srovnatelných hodnot měření, uvažujeme hodnotu sonaru.
 - ??? Proč nepostačuje samostatné použití LIDARu? → důvodem je schopnost sonaru poskytnout částečně 3D informaci (prostorově kuželový vyzařovací diagram senzoru)

Vložit obrázek grid-mapy

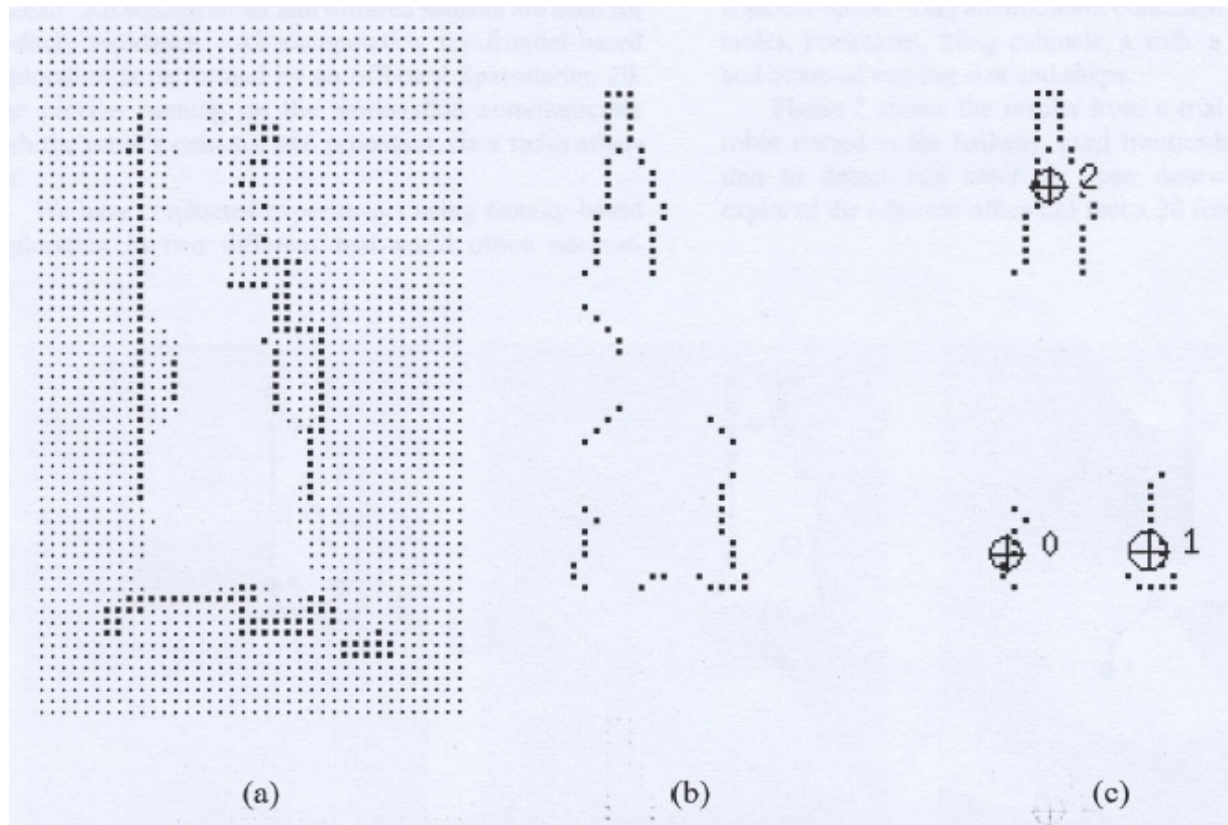
Frontier-based explorace – generování frontierů, schedulování procesu a explorace I

- Frontier je rozhraní mezi známým a neznámým prostředím, jehož pixely je v mřížkovém modelu potřebné identifikovat.
- Řešeno postupným vytvářením nové mřížky, analogické s původní mapou, obsahující výhradně pixely náležející frontierům a to v krocích:
 1. Inicializace mřížky frontierů s nastavením hodnot pravděpodobnosti pro klasifikaci pixelů do tříd, typicky:
 - $p < 0.5$ pro prázdný pixel (náleží jistě neobsazené oblasti)
 - $p = 0.5$ pro pixel s neznámým stavem (náleží dosud neexplorované oblasti)
 - $p > 0.5$ pro nedostupný pixel (náleží jistě nedostupné oblasti/překážce)a provedení základní klasifikace druhu pixelů v mřížkové mapě (prahování)
 2. Klasifikace frontierových pixelů:
 - Každý pixel mající ve svém okolí (typicky 8-mi okolí) aspoň jeden pixel s $p=0.5$ (dosud neexplorovaný pixel) získává atribut frontierového pixelu.
 - Předchozí klasifikace je provedena pro všechny pixely aktuální mřížky (variantou je po nalezení prvního frontierového pixelu segmentace narůstáním oblastí)
 - Pokud nebyl nalezen žádný další frontierový pixel, *explorace je ukončena* (prostředí je celé zmapováno)

Frontier-based explorace – generování frontierů, schedulování procesu a explorace II

2. Segmentace frontierových oblastí (frontierů):
 - Segmentace souvislých bodových oblastí (obarování oblastí) odliší vzájemně jednotlivé frontiey číselným označením (barvou).
 - Aktuální frontiey jsou uspořádány podle vzdálenosti (středu) od pozice robotu
4. Navigace robotu k frontieru:
 - Provedení výběru nejbližšího frontieru a ověření jeho dostupnosti, *opakuj krok dokud není nalezen nejbližší dostupný frontier*
 - Naviguj robot je v jednom kroku na střed nejbližšího dostupného frontieru
4. Po přemístění robotu do středu nejbližšího dostupného frontieru, obnov obsah mřížky frontierů a *jdí na bod 2*

Frontier-based explorace – generování frontierů, příklad



Vstupní mřížka obsazenosti (a) Frontierové body (b) Segmentované frontierové oblasti 0,1 a 2 (c)

Frontier-based explorace – přehled podúloh I

Podúlohy k implementaci

- **Segmentace frontierů**

1. **Obarvováním oblastí** Systematické (řádkové) procházení mřížkové mapy se současným vyšetřováním okolí aktuálního pixelu (typicky 8-mi okolí) na existenci sousedů aktuální barvy. Pokud barva existuje, aktuální pixel se obarví shodně, pokud není dosud na seznamu barev, založí se nová barva a aktuální pixel se jí označí. Pro nekonvexní objekty je nezbytný ještě krok sjednocení těsně sousedících barev. Průchodem celé mřížky je zjištěn počet souvislých objektů (= počet použitých barev) a jednotlivé pixely, náležející souvislému objektu mají uniformní barvu.

1. **Narůstání oblastí.** Metoda startuje z počátečního bodu (frontierového pixelu) a zkoumá okolní pixely z hlediska existence předem zvolené vlastnosti (zde označení frontierovým bodem $p=0.5$). Algoritmus nemusí nutně procházet celou mřížkou ale pracuje jen na úrovni narůstající oblasti (užitím algoritmu trasování vnitřní hranice).

$$x_s = \frac{1}{2}(x_i + x_j), \forall x_i, x_j; \max |x_i - x_j|$$

$$y_s = \frac{1}{2}(y_i + y_j), \forall y_i, y_j; \max |y_i - y_j|$$

Frontier-based explorace – přehled podúloh II

Podúlohy k implementaci

- **Nalezení středu 2D bodové množiny**
 - Např. jako aritmetický průměr maxima rozdílů souřadnic:

$$x_s = \frac{1}{2}(x_i + x_j), \forall x_i, x_j; \max|x_i - x_j|$$

$$y_s = \frac{1}{2}(y_i + y_j), \forall y_i, y_j; \max|y_i - y_j|$$

- Nebo výpočtem jako těžiště homogenní (binární) oblasti:

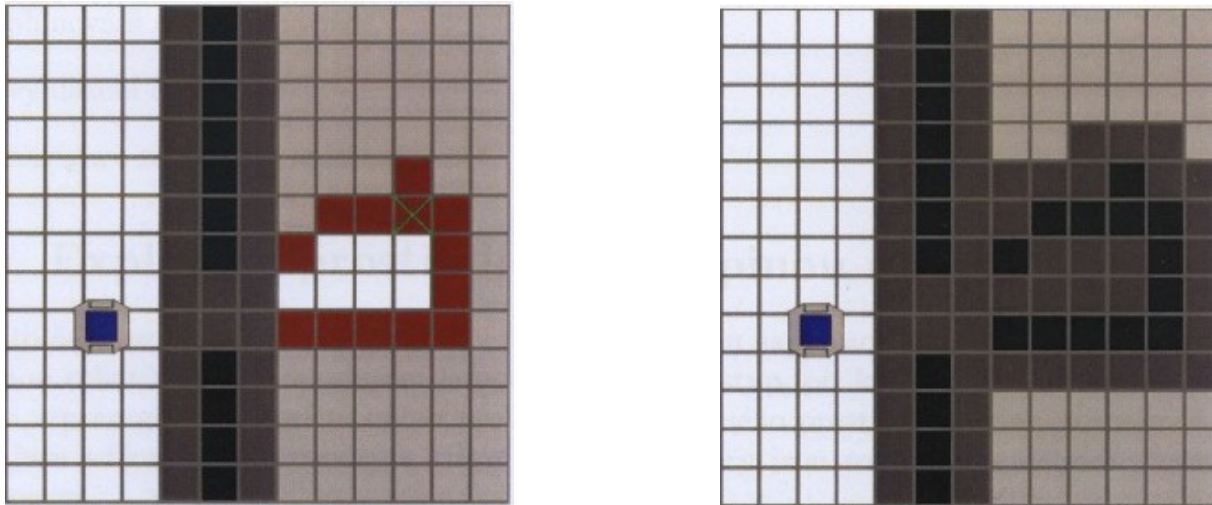
$$x_t = \frac{\sum_x \sum_y x \cdot f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)} \quad y_t = \frac{\sum_x \sum_y y \cdot f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}$$

kde $f(x, y)$ značí hodnotu jednotlivého pixelu na pozici x, y

Frontier-based explorace – přehled podúloh III

Pozn. podúlohy k implementaci

- **Ověření dostupnosti jednotlivého frontieru** – aplikace plánovacího algoritmu, viz předchozí přednášky.

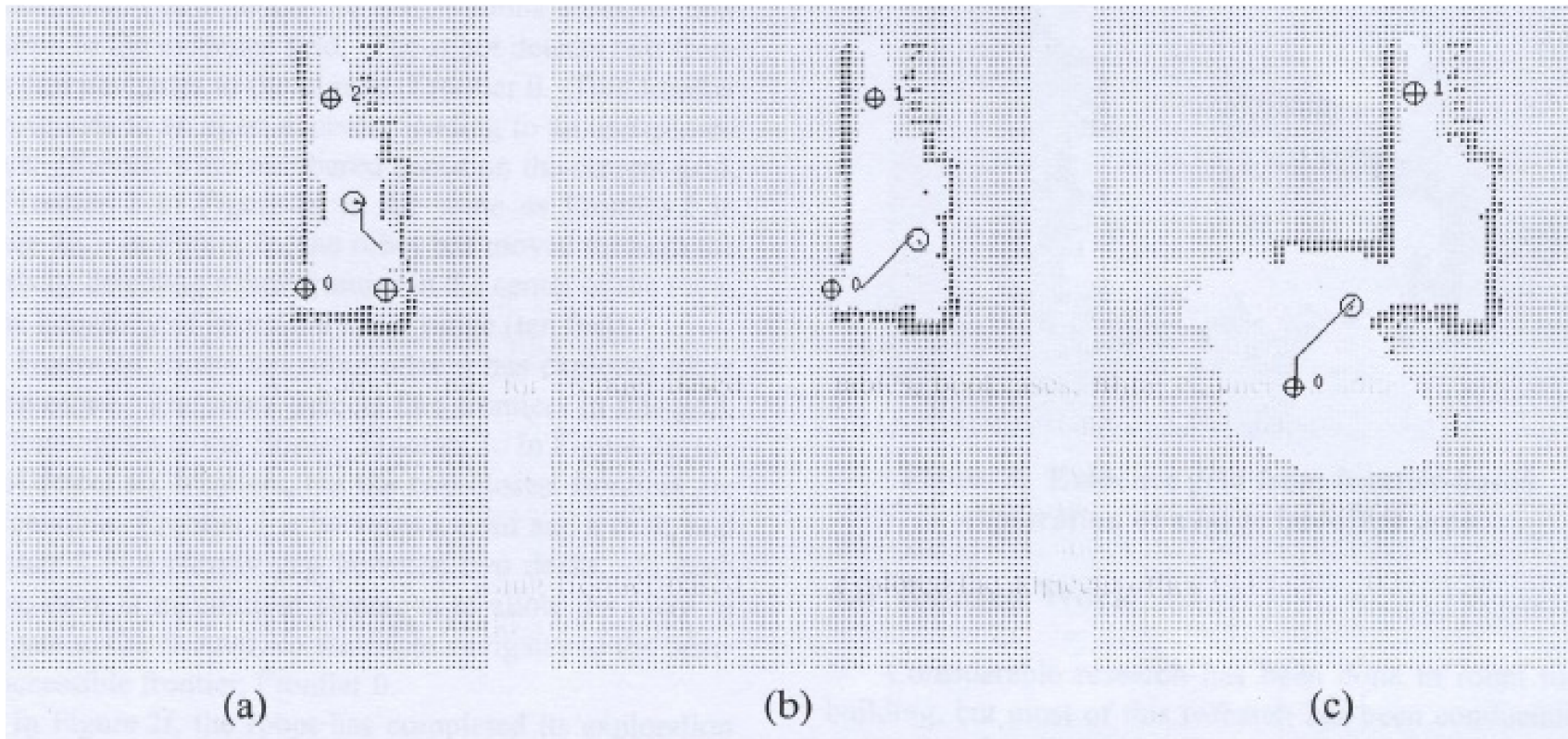


Situace s nedostupným frontierem z důvodu úzkého průchodu (vlevo) a jeho eliminací – přeznačením na překážku (vpravo).

Význam pixelů: *bílá* - dostupný, *červená* - frontier, *světle šedá* – neznámý prostor, *tmavě šedá* - dilatovaná překážka, *černá* - překážka.

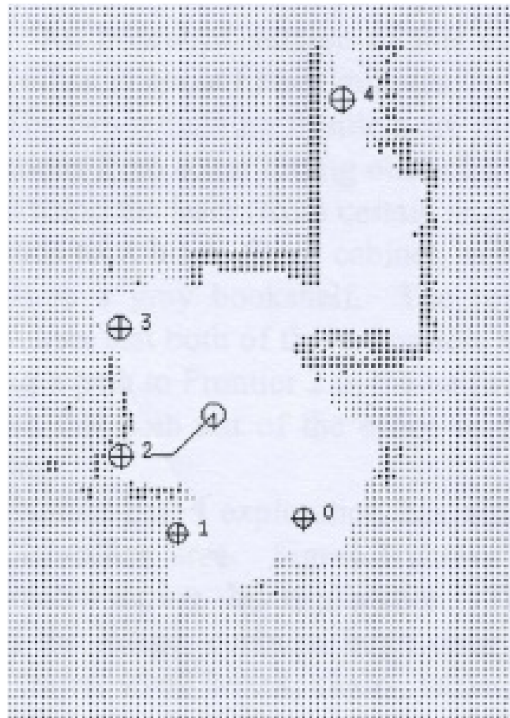
Frontier-based explorace – příklad I

Explorace v krocích (a)-(c), vzniklá mřížková mapa
(chodba a přechod do místnosti, vlevo dole)

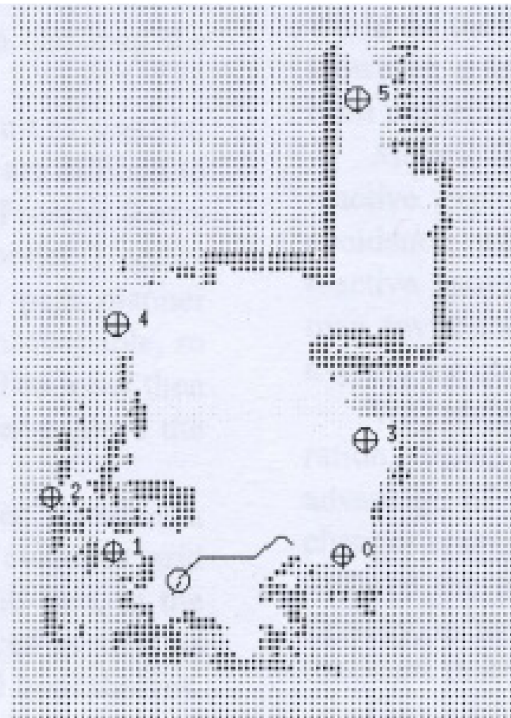


Frontier-based explorace – příklad II

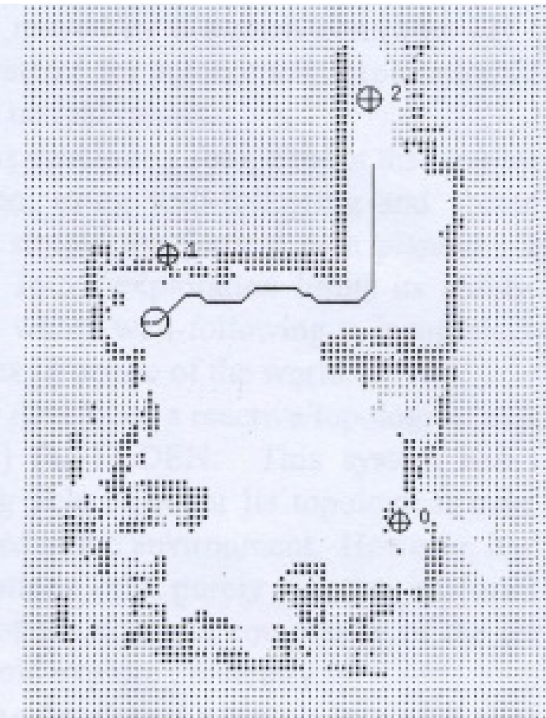
Explorace v krocích (d)-(f), vzniklá mřížková mapa
(převážně explorace místnosti)



(d)



(e)



(f)

Frontier-based explorace – příklad III

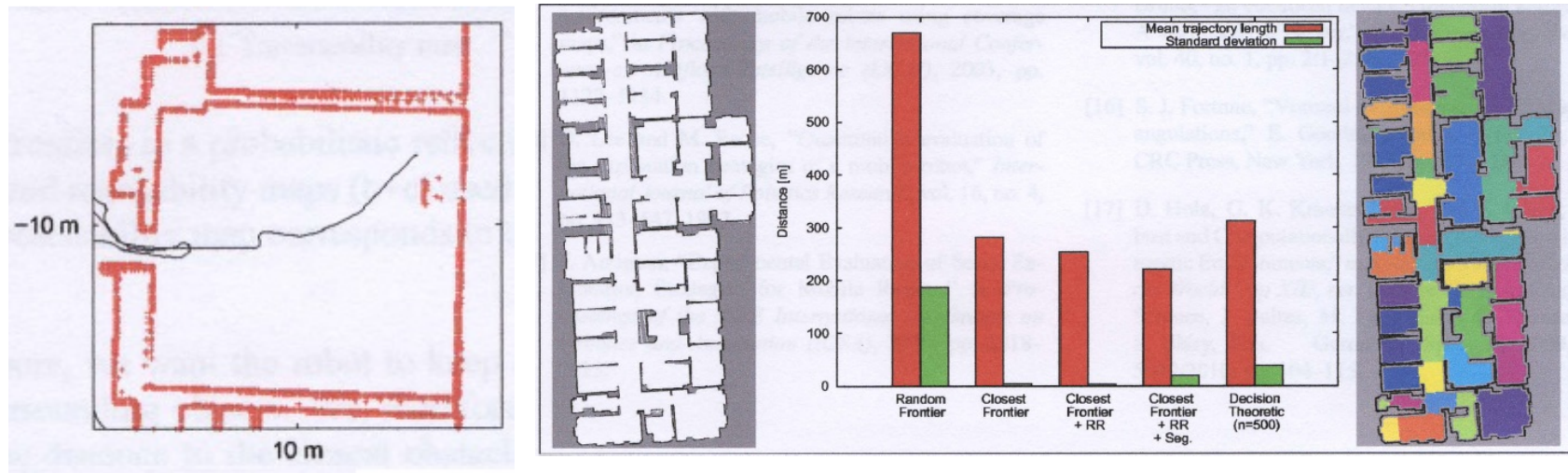
Video: Robot „Nomad“ v reálném prostředí (Yamauchi B., Naval Center for Applied Research in AI, ~4 min)



Možná vylepšení frontier-based postupu (k zamyšlení)

Úprava způsobu generování frontierů jako hranic Voroného oblastí (tvar frontierů).

- Vhodnější volba pravidel pro stanovení pořadí zpracování frontierů (metoda výběru nejbližšího frontieru je dobře optimální)
 - Zohlednění aktuálního natočení robotu a polohy robotu (např. preference zpracování vzdálenějších frontierů v kompaktních oblastech) → zkrácení explorační trajektorie (obr. vlevo)
 - Kombinace s náhodnými metodami prohledávání (Sensor-Based Random Tree)
- Způsob zpracování frontieru – náhrada středu frontieru některou jeho vhodnější částí (např. přiblížení se objektu, „zkracováním“ zatáček)



.....vede ke zlepšení v řádu 10_{tek} %

Reference:

- Yamauchi B.: *A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration*, in: Proceedings of IEEE CIRA'97 Conference, Monterey, CA, July 10-11, 6pp
- Freda L., Oriolo G.: *Frontier-Based Probabilistic Strategies for Sensor-Based Exploration*, in: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005, p. 3892-3898
- Štrunc J.: *Multirobotická explorace prostředí*, bakalářská práce, kat. Kybernetiky, FEL ČVUT, 2009, 31s
- Holz D., Basilico N., Amigoni F., Behnke S.: *Evaluating the Efficiency of Frontier-based Exploration Strategies*, in: Proceedings of the Intl. Workshop ISR-Robotik 2010, Germany, p. 36-43
- Hlaváč V. Šonka M.: *Počítačové vidění*, nakl. Grada, Praha 1992, 272s, ISBN 80-85424-67-3
- Žára J. a kolektiv: *Počítačová grafika*, Grada a.s., Praha, 1992, 472 s., ISBN 80-85623-00-5