



Algorytmy robotyki mobilnej Lokalizacja robotów

Janusz Jakubiak

Katedra Cybernetyki i Robotyki

2020/2021

Lokalizacja robotów – metody

- ▶ przyrostowe
 - ▶ odometria
 - ▶ nawigacja inercyjna
 - ▶ wizyjne (*optical flow*)
 - ▶ mapy głębi
- ▶ absolutne
 - ▶ znaczniki aktywne
 - ▶ znaczniki pasywne (sztuczne, naturalne)

oraz fuzja metod absolutnych i przyrostowych



Informacja o prawach autorskich

Prezentacja jest materiałem pomocniczym do kursu Algorytmy robotyki mobilnej. Zawarte w niej informacje, zdjęcia, wykresy i inne są chronione prawami autorskimi autorów lub wydawców. Materiały te są prezentowane w celach edukacyjnych związanych z ww. kursem. Inne ich wykorzystanie w całości lub części wymaga uzyskania zgody właścicieli praw autorskich.

Niniejsza prezentacja zawiera materiały z książki Probabilistic Robotics (S. Thurn et al.) oraz Springer Handbook on Robotics (Eds. B. Siciliano, O. Khatib)



Zadanie nawigacji przyrostowej

Mając dane tylko odczyty z sensorów pokładowych (wewnętrznych) oraz pozycję początkową $q(0)$ – wyznaczyć bieżące położenie robota $q(T)$

Jakie czujniki mogą być wykorzystane?

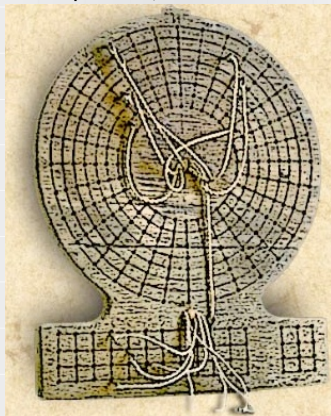
Sformułowanie problemu

Rodzaje dostępnych danych:

- ▶ Pozycja początkowa $q(0) = q_0$
- ▶ Pomiary $z(t)$ (dla każdej chwili od 0 do T)
- ▶ Model ruchu robota (np. $\dot{q} = G(q)u$)
- ▶ Pozycję poprzednią ($q(t_{k-1})$)
- ▶ Inne (ograniczenia, rozkład błędów pomiarów i pozycji początkowej itd.)

Odometria i metody przyrostowe – historia

Odometria: gr. *hodós* – droga, *métron* – pomiar)



Grecki odometr z I w p.n.e., chiński wóz pokazujący południe (III w. n.e.), tablica kursów i prędkości z XVII w. okrętu

Przykład 2 – pomiary a lokalizacja

(Khepera: średnica kół 16mm, odległość 50mm)

Początkowy stan enkoderów oraz położenie i orientacja robota są równe 0.

Po 1s odczytano z obu enkoderów i po przeliczeniu na ruch postępowy każdego z kół otrzymano $\Delta L = \Delta R = 25\pi [mm]$.

Jakie jest położenie i orientacja robota?

- ▶ przyjmując stałą i równą prędkość obu kół
- ▶ przyjmując, że przez pierwsze $\frac{1}{2}s$ porusza się tylko lewe koło, a przez drugie – prawe
- ▶ przyjmując, że przez pierwsze $\frac{1}{2}s$ porusza się tylko prawe koło, a przez drugie – lewe

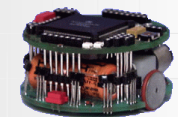
Jakie mogą być przyczyny błędów? Jak je eliminować?

Przykład 1 – dane pomiarowe

Koło napędzane jest silnikiem DC z przekładnią 25:1.

Enkoder przyrostowy na osi silnika zwraca 24 impulsy na obrót.

Koło ma średnicę 16mm, odległość kół (długość osi) – 50mm.

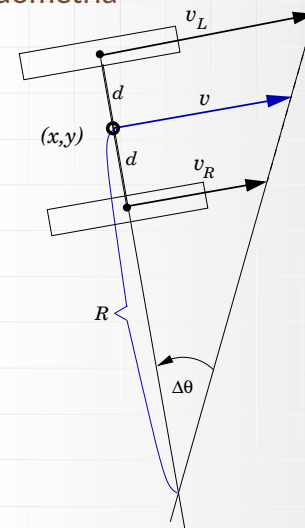


^aKhepera, K-Team

Pytania:

- ▶ ile impulsów enkodera przypada na jeden obrót koła?
- ▶ ile impulsów enkodera przypada na 1mm ruchu postępowego koła?

Odometria



Pytanie:
Mając v_R i v_L , jak obliczyć prędkość liniową i kątową środka?

$$v = \frac{v_L + v_R}{2}$$

$$\Delta x = v \Delta t \cos \theta \quad \dot{x} = v \cos \theta$$

$$\Delta y = v \Delta t \sin \theta \quad \dot{y} = v \sin \theta$$

$$\frac{R+d}{v_L} = \frac{R-d}{v_R} \Rightarrow R = \frac{2dv}{v_L - v_R}$$

$$\Delta \theta = -\frac{v}{R} \Delta t = \frac{v_R - v_L}{2d} \Delta t \quad \dot{\theta} = \frac{v_R - v_L}{2d}$$

* uwaga: $\theta, \Delta \theta$ są kątami skierowanymi

Przykład 3 – wpływ niedokładności

Dla robota Khepera (25:1, 24imp./obrót, średnica koła 16mm, odległość między kołami 50mm). Koła obracają się z prędkością kątową odpowiadającą ruchowi postępowemu 40mm/s.

- ▶ Do jakiego punktu dojedzie robot po 100s? po 628s?

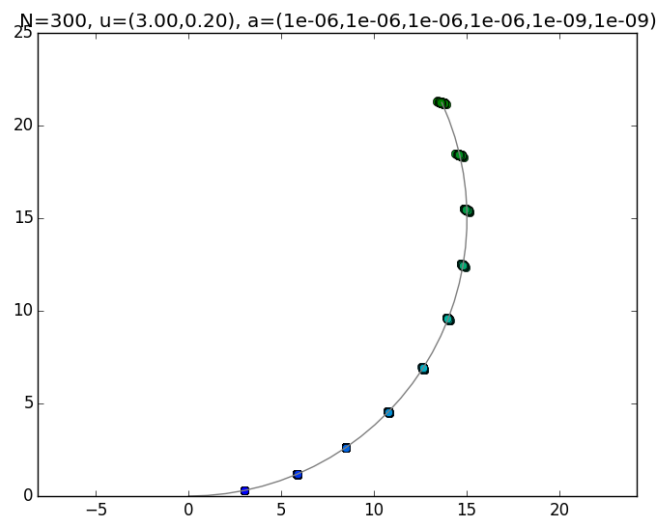
Na skutek zużycia średnica prawego koła zmniejszyła się o 0.2mm.

- ▶ O ile zmniejszy się droga przejechana przez koło w czasie 1 obrotu (w mm i procentowo)
- ▶ Jaki będzie błąd orientacji po 1s? Po 100s?
- ▶ Do jakiego punktu dojedzie robot po 628 (2*314) s?

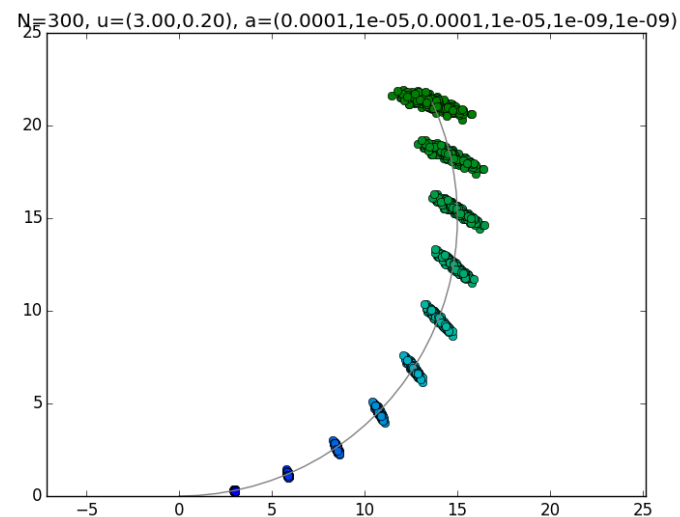
Rodzaje i przyczyny błędów odometrii

- ▶ systematyczne
 - ▶ różne średnice kół
 - ▶ rzeczywista średnica kół różna od założonej
 - ▶ rzeczywista odległość pomiędzy kołami różna od założonej
 - ▶ przesunięcie osi kół
 - ▶ rozdzielczość enkoderów
 - ▶ częstotliwość próbkowania enkoderów
- ▶ niesystematyczne
 - ▶ nierówności powierzchni
 - ▶ przeszkody na ścieżce robota
 - ▶ poślizgi: mała przyczepność podłoża, nadmierne przyspieszenie, zbyt szybkie skręcanie, siły zewnętrzne (w tym kontakt z przedmiotami), siły wewnętrzne (koła swobodne), niepunktowy kontakt z podłożem

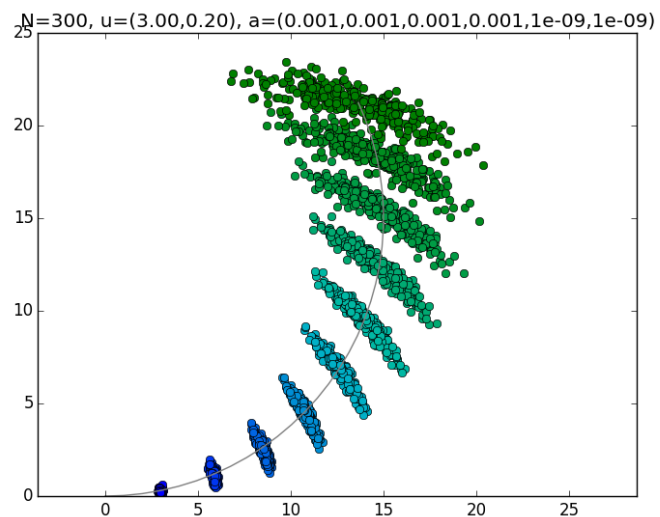
Przyrost błędu w czasie ruchu



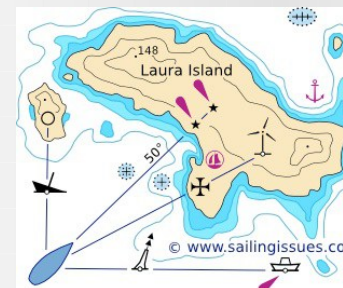
Przyrost błędu w czasie ruchu



Przyrost błędu w czasie ruchu



Jak zatem skorygować estymatę pozycji robota?



Przykład jednokrokowego (absolutnego, globalnego) wyznaczania pozycji – lokalizacja na podstawie znaczników

Metody

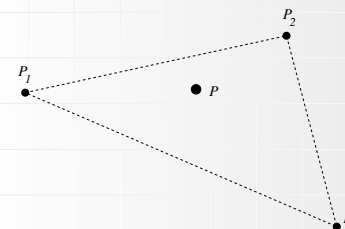
- ▶ deterministyczne
 - ▶ trilateracja – pomiar odległości do znaczników
 - ▶ triangulacja – pomiar kątów między znacznikami
- ▶ stochastyczne
 - ▶ multilateracja – pomiar różnic między odległościami do znaczników
 - ▶ multiangulacja – najczęściej pomiar kąta odbioru sygnału

Błędy pomiarowe zmniejszają się kiedy:

- ▶ robot jest w pobliżu środka wielokąta utworzonego przez znaczniki
- ▶ kąt pomiędzy znacznikami jest duży

Trilateracja

Dane: pozycje 3 znaczników i odległości do nich



$$l_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2$$

$$l_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2$$

$$l_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2$$

Metody rozwiązania

- ▶ jako układ 3 równań kwadratowych
- ▶ jako układ 1 równania kwadratowego i 2 liniowych
- ▶ we współrzędnych barycentrycznych (wyznaczniki Cayley'a-Mengera)

F. Thomas, L. Ros. Revisiting Trilateration for Robot Localization. IEEE Trans Rob, vol. 21, no. 1, pp. 93 – 101, Feb. 2005.

Triangulacja

Wymaga pomiaru kątów pomiędzy znacznikami

Znanych jest ponad 500 metod, które mogą być podzielona na 3 grupy:

- ▶ geometryczna triangulacja
- ▶ geometryczne wyznaczanie punktów przecięcia okręgów
- ▶ iteracyjne (przeszukiwanie iteracyjne, Newton-Raphson, itp.)

V. Pierlot, M. Van Droogenbroeck. A New Three Object Triangulation Algorithm for Mobile Robot Positioning. IEEE Trans Rob, vol. 30, no. 3, pp. 566-577, June 2014.

Porównania metod i biblioteki

<http://www.telecom.ulg.ac.be/triangulation/>
<https://sites.google.com/site/sunglok/tt>

Algorithm	x	y	z	trigo	time (s)	Command line
[14,15] Total	30	17	2	0	2	0.163 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[11] Liges	29	22	2	0	2	0.171 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[7] FortLigunes	23	17	2	0	5	0.223 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[12] Cassini	19	8	3	0	4	0.249 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[1] Cohen	37	15	3	2	4	0.272 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[11] Easton	22	24	1	0	5	0.298 ./triangulation -t3 -n500000 -x7
[4] McGillem	37	18	5	2	8	0.340 ./triangulation -t3 -n500000 -x5
[6] Hmam	29	11	3	3	9	0.428 ./triangulation -t3 -n500000 -x5
[2] Cohen	26	11	3	2	11	0.437 ./triangulation -t3 -n500000 -x5
[10] Esteves	43	14	2	2	11	0.471 ./triangulation -t3 -n500000 -x2
[12] Collins	34	10	2	2	11	0.485 ./triangulation -t3 -n500000 -x2
[4] McGillem	29	9	3	2	11	0.501 ./triangulation -t3 -n500000 -x5
[12] Kaeszner	28	10	3	2	11	0.504 ./triangulation -t3 -n500000 -x2
[13] Tsukiyama	52	22	3	5	14	0.598 ./triangulation -t3 -n500000 -x12
[5] Casanova	52	21	4	5	14	0.609 ./triangulation -t3 -n500000 -x4
[6] Tienstra	33	18	8	3	9	0.640 ./triangulation -t3 -n500000 -x7
[6] FortLigunes	62	25	0	1	8	0.648 ./triangulation -t3 -n500000 -x3
[3] Maden	38	24	5	3	15	0.707 ./triangulation -t3 -n500000 -x14

Names	Dim.	Inputs	Outputs	N	Time Comp.	Solvers	Functions in Triangulation Toolbox
Sage05-TOA2D	2D	map, distance	position	33	O(N ³)	pair	localize2d_sage05_2d.m
Sage05-TDOA	2D	map, relative distance	position	23	O(N ³)	pair	localize2d_sage05_tdoa.m
Shim07	2D	map, bearing angle	position, orientation	23	O(N)	exact	localize2d_shim07.m
Shim07-Ang	2D	map, bearing angle	position, orientation	33	O(N ³)	end	localize2d_shim07_ang.m
Shim07-Dir	3D	map, bearing angle	position, orientation	33	O(N ³)	end	localize2d_shim07_dir.m
Sage05-TOA3D	3D	map, displacement	position, orientation	22	O(N ³)	pair	localize3d_sage05_toa.m
Shim07	2D	map, relative pos	position, orientation	21	O(N)	exact	TDO
Sage05-TOA3D	3D	map, distance	position	24	O(N ³)	pair	localize3d_sage05_toa.m
Tienstra05	3D	map, distance	position	3	O(1)	exact	localize3d_tienstra05.m
Quan07-3pt	3D	map, bearing angle	position, orientation	3*	-	-	TDO
Quan07-4pt	3D	map, bearing angle	position, orientation	24	-	-	TDO
Quan07-5pt	3D	map, bearing angle	position, orientation	25	-	-	TDO
Lepe09-LEP	3D	map, bearing angle	position, orientation	24	O(N)	-	TDO

Multilateracja (*)

Wybrane metody

- ▶ Friedlandera – najmniejszych kwadratów (oraz z wagami)
- ▶ Sferyczne intersekcje – zakłada, że R_1 jest znane i stałe
- ▶ Sferyczne interpolacja – rozwiązywanie $x(R_1), y(R_1)$, następnie wyznaczanie R_1
- ▶ Dziel i zwyciężaj – osobne estymacje w grupach
- ▶ Szereg Taylora – linearyzacja równań
- ▶ Fanga – dokładne, z wykorzystaniem minimalnej liczby pomiarów
- ▶ Chana – dokładne, z użyciem redundantnych pomiarów

(*) także: lokalizacja hiperboliczna, metoda TDOA (time difference of arrival)

M. Aatique. Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University

Znaczniki aktywne

- ▶ sztuczna modyfikacja środowiska
- ▶ większy zasięg
- ▶ łatwo rozpoznawalne

Pasywne znaczniki

- ▶ naturalne
 - ▶ narożniki
 - ▶ ściany
 - ▶ napisy (jak np. numeracja pokoiów)
 - ▶ ... oraz inne kształty
- ▶ sztuczne
 - ▶ kody kreskowe, QR, April
 - ▶ linie na podłodze/suficie
 - ▶ RFID

Wymagają wykrycia i rozpoznania w danych pomiarowych

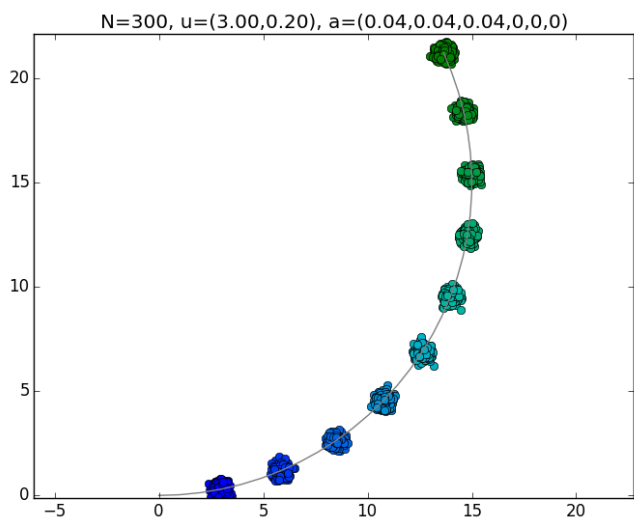
Porównanie pasywnych i aktywnych znaczników

Pasywne znaczniki cechuje

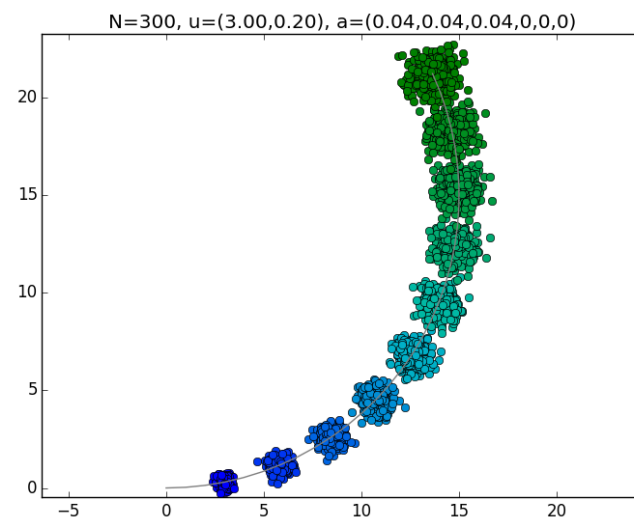
- ▶ mniejsza odległość, w której są rozpoznawalne
- ▶ dokładność wykrycia zmniejsza się z odległością od znacznika
- ▶ więcej danych wymagających przetworzenia
- ▶ niejednoznaczne znaczniki wymagają dodatkowego przetwarzania

sztuczne	naturalne
otoczenie modyfikowane łatwiejsze do wykrycia mogą nieść dodatkową informację	bez zmian w otoczeniu robota trudniejsze do wykrycia tylko pozycja znacznika

Przyrost błędu w czasie ruchu - znaczniki



Przyrost błędu w czasie ruchu - znaczniki sprz.zwr.





Pytania kontrolne

1. W jaki sposób działają przyrosowe metody lokalizacji?
2. Jakie są źródła błędów lokalizacji przyrostowej?
3. W jaki sposób realizowana jest lokalizacja globalna?
4. Jakie są różnice między lokalizacją przyrostową i globalną?
5. Jakie własności mają metody z użyciem znaczników aktywnych i pasywnych oraz naturalnych i sztucznych?