

Avtonomni mobilni sistemi v hišni avtomatizaciji

Andrej Zdešar, Gregor Klančar, Igor Škrjanc
Laboratorij za avtonomne mobilne sisteme, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, Ljubljana
andrej.zdesar@fe.uni-lj.si

Autonomous mobile systems for home automation

Nowadays, the offer of robotic vacuum cleaners, floor washing robots, robotic lawn mowers etc. is increasing. These autonomous systems are usually equipped only with several proximity sensors that enable them to detect obstacles. They drive through space in a Brownian-like motion or by tracing the edge of some obstacle. Although, they are able to visit every place of a bounded space at least once, their performance is not optimal and time efficient. For the mobile robot to achieve the optimal movement, it must have the map of the environment, and it needs to know the location of itself within the map. In this paper, we present the design of the algorithm for localization and mapping that is based on the image obtained from a camera mounted on the robot. The self-localizing mobile robots can perform optimal motion through space, and this enables them to perform a wide range of tasks autonomously.

Kratek pregled prispevka

V zadnjem času lahko na tržišču zasledimo mnoge avtonomne mobilne sisteme za čiščenje in pomivanje tal, košnjo trave itd. Večina teh avtonomnih vozil uporablja za zaznavo okolja kombinacijo senzorjev bližine, ki jim omogoča zaznavanje ovir. Po prostoru se gibljejo bodisi po naključnem vzorcu bodisi se gibajo vzdolž ovir. S takšnim načinom gibanja običajno dosežejo vsak del omejenega območja, vendar naloge ne opravijo optimalno in v najkrajšem času. Za bolj učinkovito gibanje po prostoru mora mobilni sistem poznati zemljevid okolja in svojo lego v prostoru. V prispevku bo predstavljen primer uporabe kamere za izvedbo določevanja položaja vozila v prostoru in za gradnjo zemljevida okolja. Mobilni sistemi, ki se znajo sami orientirati v prostoru, se lahko ne le optimalno gibajo po prostoru, temveč se poveča tudi nabor nalog, ki jih lahko opravljajo.

1 Uvod

Področje hišne avtomatizacije je v zadnjem času deležno velikega zanimanja. Na trgu lahko zasledimo mnogo izdelkov, ki omogočajo avtomatizacijo doma: od regulacije temperature, vlage, osvetlitve itd. do spremljanja in nadziranja naprav z oddaljene lokacije bodisi preko svetovnega spleta bodisi preko mobilne naprave. Zaznati je trend močne povezanosti najrazličnejših naprav, z namenom da delujejo usklajeno in se samodejno prilagajajo željam uporabnika.

Če smo še pred desetletjem in pol v domovih lahko le redko zasledili mobilne sisteme – le-ti so bili namenjeni predvsem za zabavo (robotske hišne živali [1]) – smo bili v zadnjem desetletju priča preboju uporabe avtonomnih mobilnih sistemov za opravljanje enostavnih hišnih opravil, kot so pometanje, sesanje in pomivanje tal [2], [3], [4], [5], košnja zelenice [6], [7], čiščenje bazena [2], čiščenje žlebov [2] itd. V tem kratkem obdobju je bilo po svetu prodano že več milijonov mobilnih sistemov za domačo uporabo.

Ko govorimo o *avtonomnih mobilnih sistemih v hišni avtomatizaciji* imamo v mislih mobilne sisteme, ki so sposobni avtonomnega gibanja v okolju, ki je primarno namenjeno gibanju človeka. Pri tem predpostavljamo, da za delovanje mobilnega sistema ni potrebno posebno skrbno prirejanje okolja. Mobilni sistem mora delovati varno in ne sme predstavljati nevarnosti za človeka. Zanesljivost mobilnega sistema ni najbolj pomembna. V primeru roja mobilnih sistemov pričakujemo usklajeno delovanje.

2 Zgradba avtonomnih mobilnih sistemov

Da se lahko mobilni sistem avtonomno giblje po (neznanem) prostoru, mora biti opremljen s senzorji, ki mu omogočajo zaznavanje okolice. Avtonomni mobilni sistemi so običajno opremljeni z naborom senzorjev: senzorji pospeška; žiroskopi; enkoderji (na kolesih);

kompasom; senzorji trka; ultrazvočnimi, infrardečimi ali laserskimi merilniki oddaljenosti; radarjem; kamerami; GPS sprejemnikom.

Senzorje delimo na notranje (tiste, ki se nahajajo na mobilnem sistemu) in zunanje. Senzorji lahko merijo notranja stanja sistema (npr. temperaturni senzor, enkoderji na kolesih) ali merijo pojave v okolici (npr. laserski merilnik oddaljenosti).

Izbira senzorjev je odvisna od namembnosti in predvidenega okolja delovanja. Mobilni sistemi so lahko namenjeni za delovanje znotraj stavb (npr. mobilni avtonomni sesalniki) ali za zunanja okolja (npr. mobilne avtonomne kosilnice). Okolja v katerih delujejo so lahko strukturirana (npr. hodniki, ceste) ali nestrukturirana (npr. gozd). Z različnimi senzorji oz. s kombinacijo različnih senzorjev lahko merimo isto količino, vendar pa ima vsaka rešitev svoje prednosti in slabosti. Npr. laserski merilniki oddaljenosti omogočajo natančno merjenje razdalj, a zaradi visoke cene niso najbolj primerni za uporabo v hišni avtomatizaciji; GPS sprejemnika ne moremo uporabiti znotraj stavb, temveč se moramo zanesti na druge senzorje, če želimo določiti svoj položaj. Pri mobilnih sistemih za hišno avtomatizacijo predstavlja cena velik faktor, zato je ceni tudi prilagojen izbor senzorjev.

2.1 Navigacija brez zemljevida

Senzorji mobilnemu sistemu omogočajo zaznavanje ovir relativno glede na njegov položaj, ki je mobilnemu sistemu neznan. Brez dodatne obdelave signalov s senzorjev mobilni sistem ne more določiti svojega položaja v prostoru (problem lokalizacije). Vendar tudi če mobilni sistem ne pozna svojega položaja v prostoru, mu informacija s senzorjev vseeno omogoča gibanje po prostoru.

Algoritmi, ki omogočajo gibanje in prečesavanje prostora brez poznavanja svoje lokacije, bodisi poskušajo slediti stenam bodisi se gibljejo povsem naključjo dokler ne naletijo

na oviro in zamenjajo smer. S takšnim načinom gibanja lahko dosežemo, da mobilni sistem obišče vsak del omejenega območja, kar je za namen npr. čiščenja tal ključnega pomena. Res je, da takšno gibanje ni optimalno, saj lahko mine precej časa preden robot prečesa celoten prostor.

Kakorkoli, takšen način (naključnega) gibanja se je v aplikacijah čiščenja tal [2] in košnji zelenice [6], [7] izkazal za uspešnega in je načeloma zelo prilagodljiv, saj deluje takorekoč v vsakem (naključnem) okolju. Mobilni sistem lahko le približno ocenjuje svoj položaj na podlagi odometrije. Ključno je predvsem zaznavanje ovir v prostoru (stene, luknje v tleh, objekti na tleh), za kar lahko uporablja preproste senzorje trka in bližine, kar omogoča ceneno in preprosto izvedbo sistema.

Nekatere izvedbe avtonomnih mobilnih čistilnih naprav uporabljajo svetilnike v okolju, ki oddajajo svetlobo v infra-rdečem (IR) spektru. S pomočjo IR svetilnika, ki se nahaja na polnilni postaji, se lahko mobilni sistem sam pripelje na polnilno postajo. Ker mobilni sistem nima zemljevida, se kaj lahko zgodi, da ne pride v vidno območje svetilnika preden se mu dokočno ne izprazni baterija. Svetilniki se lahko uporabljajo tudi za omejevanje delovnega območja.

2.2 Navigacija z zemljevidom

Brez poznavanja svojega položaja mobilni sistem ne more optimalno preiskati območja, sploh pa se ne more navigirati po prostoru. Za opravljanje velikega nabora nalog, je ena ključnih zahtev sposobnost lokalizacije. Problem lokalizacije se običajno rešuje z zlivanjem (s fuzijo) informacije z različnih senzorjev, za kar se običajno uporabljajo metode, ki temeljijo na Bayesovem filtru [8]. Pri linearnih sistemih, ki so moteni z normalno porazdeljenim šumom, se uporablja Kalmanov filter. Bolj splošni (napredni) ocenjevalniki stanj so: razširjeni Kalmanov, nepristranski Kalmanov filter, filter delcev itd. Ti ocenjevalniki stanj se uporabljajo bodisi pri

nelinearnih sistemih bodisi pri sistemih, ki so moteni s poljubno porazdeljenim šumom.

Pri mobilnih sistemih na kolesih običajno uporabljamo zlivanje informacije iz odometrije in senzorjev oddaljenosti, npr. laserskega merilnika oddaljenosti [9]. Velika pozornost je v zadnjem času namenjena uporabi kamere za namen lokalizacije [10], [11], [12]. Kamera je smatrana kot nizkocenovni senzor, ki ponuja bogato informacijo o okolju, vendar je obdelava slikovnega signala kompleksna naloga, ki zahteva veliko računsko moč. Kamera se je uporabljala za določevanje položaja mobilnih robotov pri robotskem nogometu [13].

Eden izmed ključnih problemov, ki se pojavljajo pri strojem vidu, je določevanje parov točk med slikami, ki pripadajo isti točki v prostoru. Običajno je dovolj že da najdemo določeno količino parov. V ta namen so bili razviti algoritmi, ki opišejo slike z majhno množico značilk (vektorjev). Algoritmi morajo biti zasnovani tako, da so najdene značilke invariantne na vsaj določen nabor transformacij (premik, rotacija, skaliranje, osvetljenost). Običajno imajo tri korake: iskanje značilk, opis značilk, iskanje parov med značilkami. Eden bolj znanih algoritmov za iskanje lokalnih značilk je algoritem SIFT [14]. Za njim je bila razvita še množica drugih algoritmov: SURF [15], MSER [16], ORB [17] itd.

Da se mobilni sistem lahko lokalizira, potrebuje zemljevid okolja. Zemljevid okolja je lahko vnaprej znan, lahko pa ga gradimo sproti, ko se gibamo po še neznanem okolju (sočasna lokalizacija in gradnja zemljevida). Zemljevid okolja je lahko predstavljen na mnoge različne načine: s t. i. mapo zasedenosti, v obliki grafa z vozlišči in povezavami, z naborom osnovnih geometrijskih elementov (točkami, črtami, ravninami itd.).

Določeni novejši modeli avtonomnih mobilnih sesalnikov [3], [5] uporabljajo neko izvedbo algoritma za sočasno lokalizacijo in gradnjo zemljevida. To jim omogoča, da se čiščenja prostora lotijo sistematično in zato lahko delo opravijo dokaj optimalno. Zemljevid

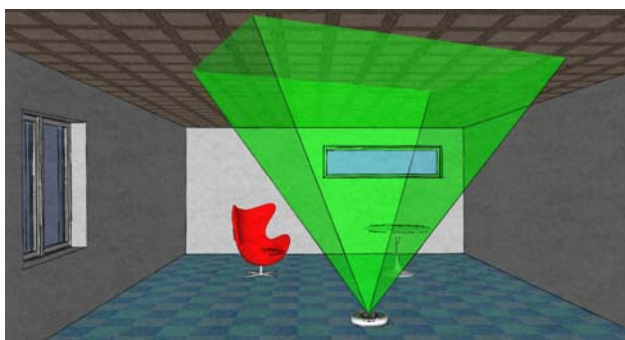
okolja jim omogoča tudi, da lahko vedno najdejo polnilno postajo.

3 Lokalizacija in gradnja zemljevida z uporabo kamere

V tem razdelku je predstavljena metoda lokalizacije in gradnje zemljevida z uporabo kamere. Sistem je zasnovan tako, da omogoča poravnavo slik, ki je robustna na ponavljajoče se vzorce.

3.1 Postavitev

Mobilni sistem sestavlja mobilni robotski sesalnik Roomba 521 proizvajalca iRobot. Komunikacija z robotom je mogoča preko serijske povezave po protokolu, ki ga je izdal proizvajalec [18]. Na robotski sesalnik je nameščena USB kamera tako, da zajema sliko stropa in je slikovna ravnina kamere poravnana z ravnino stropa (slika 1). Kamera omogoča zajem slike z ločljivostjo 640×480 slikovnih pik in s frekvenco zajema 30 slik na sekundo, čeprav ne zahtevamo frekvence višje od nekaj slik na sekundo. Mobilni robotski sesalnik in kamera sta povezana na nizkocenovni mini računalnik Raspberry Pi z operacijskim sistemom Linux (distribucija Raspbian) in nameščenim kvazi operacijskim sistemom ROS [19].

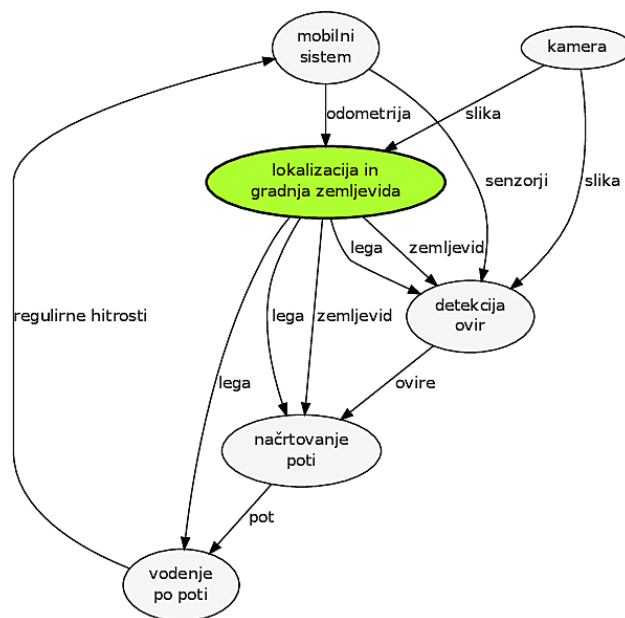


Slika 1: Postavitev kamere s prikazanim vidnim poljem.

Sistem ROS omogoča komunikacijo med porazdeljenimi programi, ki lahko tečejo na različnih računalnikih, preko sistema sporočil. Mini računalnik na mobilnem sistemu skrbi za komunikacijo med robotskim sesalnikom in sistemom ROS ter oddajanjem slike zajete s

kamero preko slikovnega sporočila v sistem ROS. Z računalnikom na mobilnem sistemu lahko komuniciramo preko brezžične povezave, sistem ROS pa omogoča, da programe, ki niso vezani na določeno strojno opremo, izvajamo bodisi na računalniku na mobilnem sistemu bodisi na katerem koli drugem računalniku v omrežju.

Na sliki 2 je grafično ponazorjena možna izvedba sistema za avtonomno navigacijo mobilnega sistema po prostoru. Vozlišča v grafu predstavljajo posamezne programe, povezave pa tok informacij (sporočil). V nadaljevanju se bomo omejili le na opis sistema za lokalizacijo in gradnjo zemljevida okolja.



Slika 2: Zgradba sistema za avtonomno navigacijo.

3.2 Lokalizacija

Algoritem za lokalizacijo temelji na uporabi razširjenega Kalmanovega filtra. Za model mobilnega vozila smo uporabili t. i. prvi kinematični model vozila, ki je enak modelu enokolesnika [20]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi \\ \dot{y} &= v \sin \varphi \\ \dot{\varphi} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

kjer trojica (x, y, φ) predstavlja lego mobilnega sistema, v je tangencialna hitrost in ω je kotna hitrost. Gre za neholonomični sistem, ki ga vodimo s podajanjem kotnih hitrosti levega in desnega kolesa oz. s podajanjem tangencialne in kotne hitrosti. Ker smo predpostavili, da opazujemo ravno površino, ki je vzporedna s slikovno ravnino kamere in ravnino gibanja robota, je model ki opisuje transformacijo med točkami na slikah a in b sledeč:

$$\begin{bmatrix} x_b & y_b & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a & y_a & 1 \end{bmatrix} \mathbf{T}_{a,b} \quad (2)$$

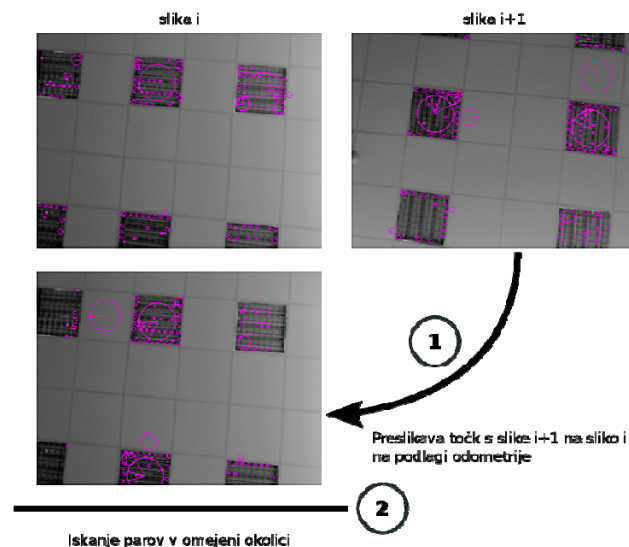
Model (2) pravzaprav opisuje splošno perspektivno transformacijo med dvema ravninama. Ko imamo opravka le s premikom, zasukom in skaliranjem v ravnini, zavzame transformacijska matrika v (2) posebno obliko.

Brž ko dobimo informacijo o spremembi zasuka levega ali desnega kolesa, naredimo korak predikcije razširjenega Kalmanovega filtra na osnovi modela mobilnega sistema. Na podlagi odometrije tako ocenimo trenutni položaj mobilnega sistema, obenem pa izračunamo tudi nove kovariančne matrike ocene.

Ko je na voljo nova slika jo najprej obdelamo tako, da dobimo transformacijo med trenutno sliko in globalnim zemljevidom, kar naredimo na sledeč način. Z algoritmom za iskanje lokalnih značilk (npr. SIFT [14]), določimo lokacije točk na sliki katerih okolica ima določene posebne lastnosti (značilnosti). Vsako najdeno značilko nato še opišemo z njeno okolico z izbranim algoritmom za opis značilk (npr. SIFT). Vse značilke nato preko modela, ki ga ocenimo na podlagi ocenjenega premika iz odometrije med trenutno sliko in globalnim zemljevidom, preslikamo v globalni koordinatni sistem. V kolikor bi algoritem za iskanje značilk našel značilne točke na enakih mestih na obeh slikah in bi bil ocenjen premik med slikama točno znan, bi se morale preslikane značilke s trenutne slike točno pokriti z značilkami v globalnem zemljevidu (glej sliko 3).

Nato poiščemo pare med trenutnimi značilkami in značilkami v globalnem

zemljevidu s primerjavo vektorjev s katerimi smo opisali posamezne značilke. Iskanje vsakega para omejimo le na določeno območje okoli položaja značilke v globalnem koordinatnem sistemu. Velikost preiskovalnega območja okoli značilne točke lahko prilagodimo glede na nezanesljivost ocene transformacije med trenutno sliko in globalnim zemljevidom iz odometrije. V kolikor v izbrani okolici neke značilke ne najdemo njenega para z mero podobnosti nad določenim pragom, gre za značilko brez para. Tak princip iskanja parov med značilkami ima predvsem dve prednosti pred iskanjem parov med vsemi značilkami v globalnem zemljevidu. Iskanje parov je bistveno pohitreno, saj ni potrebno primerjati značilnih vektorjev s trenutne slike z vsemi vektorji v globalnem zemljevidu značilk. Obenem na ta način odpravimo tudi napačne pare, ki se pojavljajo v primeru ponavljajočih se vzorcev.



Slika 3: Postopek iskanja parov.

Ko imamo na voljo pare med značilkami s trenutne slike in globalnim zemljevidom, lahko izračunamo transformacijo, ki povezuje sliko z globalnim zemljevidom. Vendar pa so med najdenimi pari še vedno lahko tudi napačno razvrščeni pari, ki dejansko ne pripadajo isti točki v prostoru in lahko zelo pokvarijo oceno transformacije. Zato iskano transformacijo ocenimo z eno izmed metod za robustno ocenjevanje parametrov modela: npr. z metodo

RANSAC [21], ki daje pravilni rezultat tudi pri velikem številu napačno razvrščenih parov.

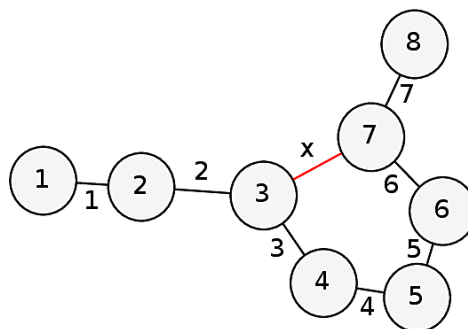
Ko je znana transformacija med trenutno sliko in globalnim zemljevidom, popravimo oceno lege mobilnega sistema – napravimo korekcijski korak v razširjenem Kalmanovem filtru.

3.3 Gradnja zemljevida

Do sedaj smo predpostavljali, da je globalni zemljevid okolja znan. Če pa zemljevida nimamo, ga moramo zgraditi. Značilke prve zajete slike shranimo v še prazen zemljevid. Nato nadaljujejo po enakem postopku kot v prejšnjem poglavju, le da vedno primerjamo značilke trenutne slike z značilkami s prejšnje zajete slike. Ko se premaknemo za določeno vrednost od slike, ki smo jo nazadnje shranili v zemljevid (tako, da se del značilk zadnje shranjene slike prekriva z značilkami trenutne slike), shranimo značilke trenutne slike v zemljevid skupaj z ocenjeno transformacijo med zadnjo shranjeno sliko v zemljevidu in trenutno sliko. S premikanjem po neznanem prostoru gradimo zemljevid. Zemljevid značilk si lahko predstavljamo tudi v obliki grafa. Značilke ene slike predstavimo kot vozlišče, s povezavo med vozlišči pa označimo ocenjeno transformacijo med vozlišči. S takšnim načinom gradnje dobimo zemljevid, ki je ena sama veriga povezanih vozlišč (glej sliko 4).

Pri takšnem načinu gradnje zemljevida se pojavi problem lezenja, ki je tipičen pri odometriji. Zato mora biti gradnja zemljevida nadzorovana. Vzpostavljen mora biti sistem, ki preverja in posodoblja relacije med posameznimi vozlišči v zemljevidu. Glavni nalogi takšnega sistema sta iskanje zaključene poti (med sicer nepovezanimi vozlišči) in sestavljanje razdrobljenih delov zemljevida. Če med trenutno in prejšnjo sliko ni bila najdena ustrežna transformacija ali je bil mobilni sistem *ugrabljen*, začnemo na novo graditi zemljevid od trenutne točke dalje. Nadzornik gradnje zemljevida nato poskuša združiti razdrobljene dele zemljevida z dodajanjem in odvzemanjem povezav in vozlišč.

Problem zaključene poti je nakazan na sliki 4. Povezave od 1 do 7 so bile ocenjene po zgoraj opisanem postopku. Vendar transformacija med vozliščema 3 in 7 (povezava x) ne ustreza dejanskemu stanju. Če sta vozlišči dovolj blizu, lahko poskusimo ponovno poiskati transformacijo med vozliščema z iskanjem parov med značilkami obeh vozlišč, vendar pa moramo nato popraviti ne le vozlišče 7, temveč vsa vozlišča v grafu.



Slika 4: Graf zemljevida okolja.

Zgrajen zemljevid okolja po zgoraj opisanem postopku omogoča lokalizacijo mobilnega sistema v prostoru. V kolikor želimo, da se zna robot avtonomno premikati po prostoru, mora poznati tudi lokacije ovir. Območja v zemljevidu zato običajno razdelimo v vsaj tri razrede: prosto, ovira in neznan. Prostor razvrstimo po razredih glede na odčitke s senzorjev, ki omogočajo zaznavo ovir (npr. senzorji trka, senzorji bližine). Lokacijo zaznane ovire nato vrišemo v zemljevid glede na trenutno lokacijo mobilnega sistema. To pa je že naloga podsistema za zaznavanje ovir in ni del podrobnejše obravnave v tem prispevku.

4 Zaključek

V prispevku so bili predstavljeni pristopi za navigacijo, ki jih uporabljajo avtonomni mobilni sistemi v hišni avtomatizaciji. Podrobneje je bil predstavljen primer metode za lokalizacijo in gradnjo zemljevida z uporabo kamere. Opisani so bili ključni problemi, ki se pri tem pojavljajo; nakazane pa so bile tudi določene rešitve. Predstavljen je bil postopek, ki zmanjša računsko zahtevnost iskanja parov in omogoča pravilno razvrščanje parov tudi ko se vzorci v okolju ponavljajo. Predstavljeni primer je bil

sestavljene iz nizkocenovnih komponent, saj ima cena naprav za hišno avtomatizacijo pomemben faktor.

Problem lokalizacije in gradnje zemljevida je kompleksen, a je tudi eden izmed ključnih sestavnih delov avtonomnega mobilnega sistema. Avtonomnemu mobilnemu sistemu omogoča optimalno vodenje z optimalno izrabo energije, kar je še en pomemben faktor v hišni avtomatizaciji.

5 Literatura

- [1] "Aibo." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.sony-aibo.co.uk>. (28.2.2013).
- [2] "iRobot Corporation." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.irobot.com>. (28.2.2013).
- [3] "Neato Robotics." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.neatorobotics.com/>. (28.2.2013).
- [4] "Kärcher Robocleaner." [Spletna stran]. Dostopno na: http://www.kaercher.de/de/Produkte/Home_Garden/Sauger/Robocleaner.htm. (28.2.2013).
- [5] "Samsung Robotic Vacuum Cleaners." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.samsung.com/uk/consumer/home-appliances/vacuum-cleaner/robot>. (28.2.2013).
- [6] "Husqvarna Automower." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.husqvarna.com/si/products/robotic-mowers/husqvarna-robotic-mowers-for-homeowners/>. (28.2.2013).
- [7] "Robomow." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.robomow.com>. (28.2.2013).
- [8] D. Fox, J. Hightower, L. Liao, D. Schulz, in G. Borriello, "Bayesian filtering for location estimation," *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 2, no. 3, str. 24–33.
- [9] L. Teslić, I. Škrjanc, in G. Klančar, "Using a LRF sensor in the Kalman-filtering-based localization of a mobile robot.," *ISA transactions*, vol. 49, no. 1, str. 145–53, 2010.
- [10] J. Civera, O. G. Grasa, A. J. Davison, in J. M. M. Montiel, "1-Point RANSAC for extended Kalman filtering: Application to real-time structure from motion and visual odometry," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 5, str. 609–631, 2010.
- [11] T. Krajník, "Large-scale mobile robot navigation and map building," *Czech Technical University in Prague*, 2011.
- [12] F. von Hundelshausen, "Computer Vision for Autonomous Mobile Robots," *Freien Universität Berlin*, 2004.
- [13] G. Klančar, M. Kristan, S. Kovačič, in O. Orqueda, "Robust and efficient vision system for group of cooperating mobile robots with application to soccer robots.," *ISA transactions*, vol. 43, no. 3, str. 329–342, 2004.
- [14] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, str. 91–110, 2004.
- [15] H. Bay, T. Tuytelaars, in L. Van Gool, "Speeded-UpRobustFeatures (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, str. 346–359, 2008.
- [16] J. Matas, O. Chum, M. Urban, in T. Pajdla, "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions," *Image and Vision Computing*, vol. 22, no. 10, str. 761–767, 2004.
- [17] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, in G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF," *2011 International Conference on Computer Vision*, str. 2564–2571, 2011.
- [18] iRobot, "iRobot Roomba Serial Command Interface (SCI) Specification," 2005.
- [19] "ROS." [Spletna stran]. Dostopno na: <http://www.ros.org>. (28.2.2013).
- [20] S. M. LaValle, *Planning algorithms*. Cambridge University Press, 2006, str. 1007.
- [21] M. A. Fischler in R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, str. 381–395, 1981.