

Interiérová lokalizácia pre prevádzku UAV

Ing. Daniel Sedlák, Qintec a.s., Priemyselná 5/C, 917 01 Trnava

daniel.sedlak@qintec.sk

ABSTRAKT

Publikácia sa zaoberá interiérovou lokalizáciou pre prevádzku UAV, pričom je rozdelená na dve časti. Prvá je venovaná technológiám lokalizačných systémov a metódam pre lokalizovanie. Druhá časť sa venuje výberom vhodných technológií pre realizáciu prototypu kvadrokopty.

KEÚČOVÉ SLOVÁ

UAV, SLAM, lokalizácia, mapovanie, kvadrokopty, senzory, autopilot

1. ÚVOD

V dnešnej dobe sa čoraz viac stretávame s pojmom „unmanned air vehicle“ (UAV) - bezpilotné lietajúce stroje, akými sú napríklad drony. V tejto publikácii sa zaoberáme výskumom a vývojom prototypu riešenia systému interiérovej lokalizácie pre prevádzku mnohoúčelovej kvadrokopty. Prvou podmienkou schopnosti bezpilotného riadenia je znalosť polohy dronu v priestore a znalosť prekážok v okolí. Na tento účel slúži množstvo algoritmov, senzorov, a technológií, vďaka ktorým nemusí byť vyhodnotenie lokalizácie zložitá. S určením presnej polohy UAV prostriedku v priestore je však spojená nepresnosť, ktorú je potrebné minimalizovať.

2. TECHNOLÓGIE LOKALIZAČNÝCH SYSTÉMOV

Wi-Fi

Wi-Fi je názov populárnej bezdrôtovej sieťovej technológie, ktorá funguje v rámci RF pásma 2,4 GHz pre IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE802.11n a v 5 GHz pre IEEE 802.11a. Vnútročné prostredie, akým je univerzita, alebo budova s kancelárskymi miestami, majú už takmer všetky nainštalované distribuované WiFi hot spoty, ktoré poskytujú pokrytie celej budovy. Medzi zariadenia, ktoré využívajú technológiu Wi-Fi, patria napríklad osobné počítače, smartfóny, digitálne fotoaparáty, tablety^[1, 2]. Náklady na nákup infraštruktúry a používateľských zariadení pre Wi-Fi môžu byť veľmi nízke. Pokrytie Wi-Fi je veľmi závislé na konštrukcii budovy, priemerne však dosahovala vzdialenosť približne 100 m. Nové štandardy a technológie umožnili zvýšiť pokrytie na približne 1 km. Lokalizácia Wi-Fi zariadení je založená na RSS (sile prijatého signálu)^[3, 4]. Wi-Fi pokrýva širšie oblasti ako Bluetooth a poskytuje vyššiu priepustnosť, vďaka čomu je používanie Wi-Fi praktickejšie^[3].

Bluetooth

Bluetooth (IEEE 802.15.1) je určený pre bezdrôtovú komunikáciu na krátku vzdialenosť medzi zariadeniami. Bluetooth na komunikáciu využíva rádiové vlny s frekvenciami medzi 2,402 GHz a 2,480 GHz. Vyznačuje sa cenovou efektívnosťou, nízkym vysielačím výkonom, výdržou

batérie, bezpečnou a efektívnou komunikáciou a dostupnými riešeniami [5, 6]. Nová verzia Bluetooth s názvom „Bluetooth Low Energy“ (BLE) dokáže pokryť priestor do vzdialenosti 70–100 m s rýchlosťou až 24 Mbps a vyššou energetickou účinnosťou [7]. Vzhľadom na to nie je Bluetooth vhodný na lokalizáciu pre veľkú oblasť [8]. Môže byť použitý na zistenie polohy používateľa na základe meraní RSS. V poslednej dobe sa lokalizácia založená na BLE využíva v smartfónoch ako iBeacons (Apple) a Eddystone (Google). Smartfón možno použiť na lokalizáciu v rámci letísk, železničných staníc, veľkých trhov, nákupných centier a reštaurácií, kde je mapa oblasti odoslaná do smartfónu a následne sa vykoná lokalizácia pomocou BLE [7].

Ultrazvuk

Ultrazvuková lokalizácia je vynikajúca pri krátkych vzdialenostiach kvôli nízkej spotrebe energie a lacným komponentom [9]. Na druhej strane sa môže znižovať presnosť lokalizácie pomocou tejto technológie v dôsledku viacnásobných odrazov z povrchov a problémov so synchronizáciou medzi komunikujúcimi uzlami [10, 11]. Ultrazvukové lokalizačné systémy sú však náročné na výpočtový výkon z dôvodu použitia komplexných algoritmov spracovania signálov. Ak sa však splnia všetky podmienky, tak presnosť lokalizácie môže dosiahnuť pár centimetrov. Aby boli výsledky presné, je potrebné umiestnenie ultrazvukových uzlov určiť pred lokalizáciou [12].

Komunikácia viditeľným svetlom

VLC „visible light communication“ alebo komunikácia viditeľným svetlom je technológia lokalizačného systému, ktorú možno použiť na miestach citlivých na rádiové frekvencie. Ukázalo sa, že VLC poskytuje vyššiu presnosť v porovnaní so systémami Wi-Fi. Vďaka zlúčeniu diód vyžarujúcich svetlo (LED) sa VLC široko používa pri lokalizácii. LED má mnoho výhod, vrátane dlhšej životnosti, odolnosti voči vlhkosti, nízkej spotreby energie a nízkych prevádzkových nákladov. LED môže tiež modulovať signály svetelných vln pri vysokej rýchlosti [13]. Lokalizáciu pomocou VLC je možné vykonať pomocou systémov na báze fotodiód, ktoré zachytávajú intenzitu svetla a systémov založených na obrazových senzoroch, ktoré dokážu zachytiť svetelné impulzy [14]. LED aj senzory by však mali byť v zornom poli pre presnú lokalizáciu. Detekcia svetla a lokalizácia vzdialenosti (LiDAR) poskytuje informácie o obrysoch okolitých prekážok a tým môžu tieto systémy poskytnúť presnú lokalizáciu [15].

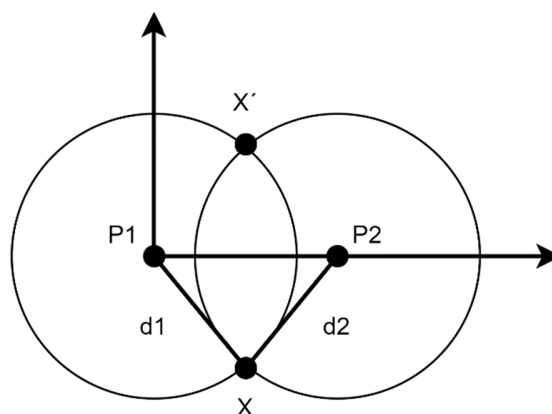
3. METÓDY LOKALIZÁCIE

Technológie ako Wi-Fi, Bluetooth, či ultrazvuk sú vhodné na použitie dvoch metód lokalizácie, ktorými sú triangulácia a trilaterácia, zatiaľ čo VLC je možné využiť pri ICP algoritme. Triangulácia a trilaterácia na lokalizáciu využíva princíp výpočtu pozície pozorovateľa vzhľadom na množinu orientačných bodov. Iteračný najbližší bod (ICP) sa často používa na rekonštrukciu 2D alebo 3D povrchov z rôznych skenovaní, lokalizáciu robotov a dosiahnutie optimálnej plánovanej cesty.

Triangulácia

Odhad pozície touto metódou je známy už veľmi dlho. Uvedené odhady polohy, alebo vzdialenosti od viacerých orientačných bodov s vopred známymi polohami umožňujú zástupcovi vypočítať svoju vlastnú pozíciu. Najjednoduchší a najznámejší prípad je ten, ktorý zároveň pomenúva túto metódu. Ako princíp používa uhly, alebo meranie vzdialenosti voči viacerým

orientačným bodom. Triangulácia rieši planárne úlohy polohovania, teda parametre trojuholníka vzhľadom ku kombinácii strán a uhlov. Aj keď geometria trojuholníka nie je jediná možnosť pre použitie orientačných bodov, je to azda ten najprirodzenejší spôsob ^[16].



Obr. 1. Najjednoduchší triangulačný prípad ^[17]

Obr.1. - Robot na neznámom mieste X sníma dva orientačné body P1 a P2 meraním k nim príslušných vzdialeností D1, a D2. (To zodpovedá prípadu, kedy majáky v známych miestach vydávajú signál a robot získa vzdialenosť na základe časového oneskorenia, kedy robot signál prijme.) Robot musí ležať na priesečníku kružnice s polomerom d1, so stredom v P1 a s kružnicou o polomere d2 a stredom P2. Bez straty všeobecnosti môžeme predpokladať, že pôvodný orientačný bod je P1 je v bode (0,0) a P2 je v (a, 0). Písmeno a označuje známu vzdialenosť orientačných bodov P1, a P2 ^[17].

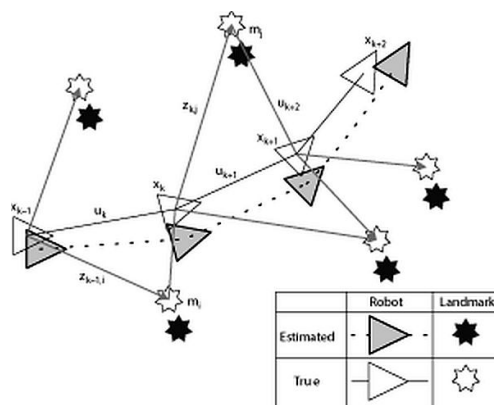
ICP algoritmus

ICP algoritmus je metóda porovnávania skenov, ktorá pristupuje k SLAM „Simultaneous localization and mapping“ problému bez použitia príznaku, každý bod sensorického merania môžeme považovať za samostatný príznak a potom sa tento rozdiel vytráca. Základom týchto metód je nájdenie optimálnej transformácie medzi niekoľkými nasledujúcimi sensorickými meraniami, prípadne je hľadaná transformácia napríklad medzi mriežkou obsadenosti a novým sensorickým meraním. Optimálna transformácia je potom hľadaná vybranou optimalizačnou metódou, väčšinou optimalizačným algoritmom najmenších štvorcov ^[18]. Výhoda týchto metód je zrejma a jej použitie je vhodné v komplikovaných prostrediach vzhľadom na množstvo prekážok, ktoré môžu blokovat signál pre predošlú metódu. Tvorba primitívnej bodovej mapy je relatívne jednoduchá, na druhej strane sú tieto metódy citlivé na počiatočné podmienky.

4. SIMULTÁNNA LOKALIZÁCIA A MAPOVANIE (SLAM)

SLAM je skratka pre Simultánnu lokalizáciu a mapovanie. V mapovaní je problém integrovať informácie, ktoré zhromažďujú senzory robota do danej reprezentácie. To môže byť opísané otázkou: „Ako vyzerá svet?“. Centrálné aspekty v mapovaní sú reprezentácia prostredia a interpretácia dát sensorov. Na rozdiel od mapovania, v lokalizácii je problémom odhad pozície robota vo vzťahu k mape. Inými slovami, robot má odpoveď na otázku: „Kde to som?“. Zvyčajne sa rozlišuje medzi pozíciou sledovania, keď je začiatočná pozícia známa a globálnou lokalizáciou, v ktorej nebola daná žiadna prioritná vedomosť o štartovacej pozícii. Simultánnu lokalizáciu a

mapovanie je preto definované ako problém vybudovania mapy, v ktorej v rovnakom čase prebieha lokalizácia robota bez použitia tejto mapy. V praxi nemožno tieto dva problémy riešiť nezávisle od seba. Predtým, ako robot môže odpovedať na otázku „Ako prostredie vyzerá?“, z výsledkov pozorovania je potrebné vedieť, z ktorého prostredia získané pozorovania pochádzajú. Zároveň je ťažké bez mapy odhadnúť aktuálnu polohu robota. Preto je SLAM často prirovnávaný k problému: „Čo bolo skôr? Sliedka alebo vajce?“ Dobrá mapa je potrebná pre lokalizáciu, zatiaľ čo presný odhad pozície je potrebný na vytvorenie mapy.



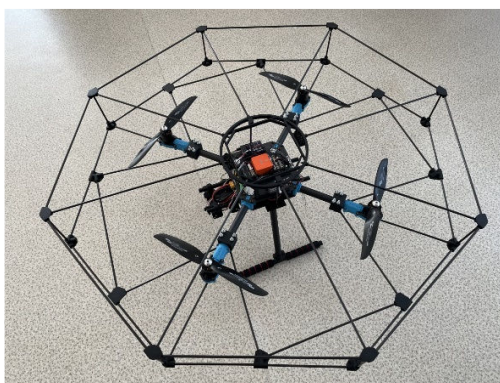
Obr. 2 Základný SLAM problém ^[19]

Obr. 2. - V časovom okamihu k , sú nasledujúce veličiny definované ako:

- x_k - stavový vektor, ktorý popisuje umiestnenie a orientáciu robota.
- u_k - kontrolný vektor, ktorý aplikuje v čase $k-1$ riadiť vozidlo na stav x_k v čase k .
- m_i - vektor, ktorý popisuje umiestnenie i -teho orientačného bodu, ktorého pravé umiestnenie predpokladá, že je nemenné.
- z_{ik} - pozorovanie prevzaté z miesta vozidla i -teho orientačného bodu v čase k . Keď existuje viac pozorovaní orientačných bodov v jednom okamihu alebo keď konkrétny orientačný bod nie je relevantný k diskusi, pozorovanie bude zapísané iba ako z_k .

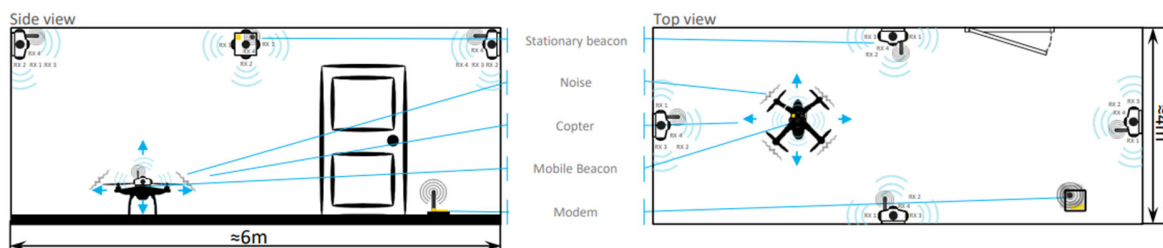
5. NÁVRH A REALIZÁCIA PROTOTYPOVÉHO RIEŠENIA

Pri realizácii prototypu sme použili stavebnicu dronu kvadrokoptéry HOLYBRO X500 V2 obsahujúcu všetky potrebné komponenty ako konštrukcia, motory, vrtule, atď. Riadenie letu zabezpečuje autopilot Cube Orange s redundantným IMU systémom.



Obr. 3. Kvadrokoptéra HOLYBRO X500 V2

Po zostavení dronu a nakonfigurovaní autopilota bolo realizovaných niekoľko skúšobných letov pomocou RC ovládača. Ďalším krokom bola lokalizácia dronu, ktorá prebiehala v hale určenej na výskum a vývoj v rámci projektu. Po rozmiestnení dodaného hardvéru sa prešlo k testom, ktoré dokázali, že z použitých technológií najpresnejšie určenie pozície v interiéri dosahuje ultrazvuková technológia od Marvelmind robotics.



Obr. 4. Príklad umiestnenia Marvelmind Super-Beacon [20]

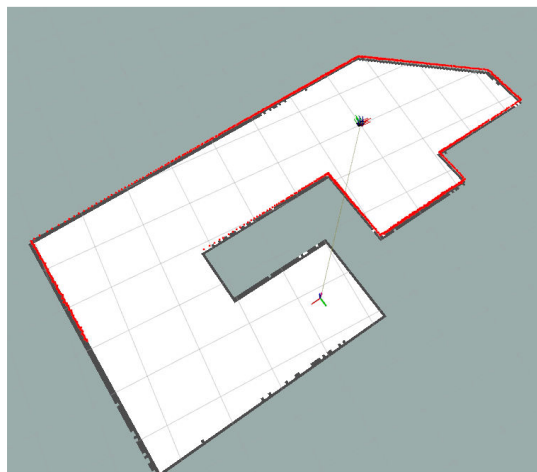
Lokalizácia Marvelmind Super-Beaconmi je natoľko presná, že po pripojení vyhodnocovacej jednotky k autopilotu Cube Orange sa vytvára možnosť ovládať dron s presnosťou na niekoľko centimetrov. Keďže beacons vytvárajú interiérový navigačný systém a dron ovláda autopilot, tak je po zadaní cieľových súradníc možný autonómny presun dronu z bodu A do bodu B.

Nevýhodou tejto metódy lokalizácie je zložitá príprava priestoru, v ktorom sa bude dron pohybovať. Je nevyhnutné zabezpečiť presné polohy beaconov, v priestore sa nesmú vyskytovať prekážky, atď. To však nie je v mnohých prípadoch možné a preto sme využili kombináciu technológií – lokalizáciu a mapovanie SLAM. Tento prístup si vyžaduje vysoký výpočtový výkon a použitie technológií na meranie vzdialenosti. Preto sme navrhli použitie vývojovej dosky NVIDIA Jetson Nano Developer Kit. Tento modul poskytuje vysoký výpočtový výkon a je prispôbený pre vývoj AI.



Obr. 5. Jetson Nano Developer Kit

Nevyhnutou súčasťou SLAM je zhromažďovanie dát zo senzorov merajúcich vzdialenosť v okolí dronu, aby bolo možné vytvorenie mapy a lokalizácie v nej. Nakoľko sa dron pohybuje v trojrozmernom priestore, je vybavený stereoskopickou kamerou ZED 2 pre 3D skenovanie priestoru pred dronom a pre súvislé skenovanie celého okolia pomocou LiDAR-u RPLIDAR A3. LiDAR je zapojený k vývojovej doske, na ktorej beží operačný systém LINUX a robotický operačný systém ROS. Systém ROS zabezpečuje simultánnu lokalizáciu a mapovanie za pomoci LiDAR-u. Vývojová doska pomocou sériového rozhrania komunikuje s autopilotom a zasiela mu aktuálne dáta o polohe.



Obr. 6. Príklad mapy zo skenovania LiDAR-om ^[21]

SLAM spracuje dáta z LiDAR-u a po vyhodnotení začne zobrazovať mapu s lokalizáciou, ktorú je možné overiť aj s presnou pozíciou vďaka Marvelmindu. Momentálne sa pomocou RC ovládača lieta po hale a testuje sa funkčnosť pred pridaním stereoskopickej kamery, ktorá bude predovšetkým slúžiť na autonómnou navigáciu.

ZÁVER

V prvej časti publikácie boli predstavené technológie - Wi-Fi, Bluetooth, ultrazvuk a komunikácia viditeľným svetlom. Tieto technológie majú rôzne využitie v oblastiach, akými sú napríklad prenos dát a fungujú v rámci výskumu a vývoja prototypu UAV ako lokalizačný systém. Lokalizačný systém využíva na určenie polohy rôzne metódy a techniky, ako napríklad ICP algoritmus využívaný pri simultánnej lokalizácii a mapovaní (SLAM). V druhej, vývojovej časti, bolo zrealizované zostavenie kvadrokoptéry HOLYBRO X500 V2, návrh hardvéru a spustenie simultánnej lokalizácie a mapovania pomocou RPLIDAR A3 v prostredí operačného systému ROS. Pre zvýšenie bezpečnosti sme navrhli vlastnú bezpečnostnú kľetku vyrobenú z karbónových tyčí pospájaných na mieru namodelovanými a vytlačenými spojkami v laboratóriu prostredníctvom 3D tlačiarne.

POĎAKOVANIE

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt „Inteligentné operačné a spracovateľské systémy pre UAV“, kód projektu v systéme ITMS2014+: 313011V422, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



LITERATÚRA

- [1] Chen, Z., Zou, H., Jiang, H., Zhu, Q., Soh, Y. C., & Xie, L. (2015). Fusion of WiFi, smartphone sensors and landmarks using the Kalman filter for indoor localization. *Sensors*, 15(1), 715–732.
- [2] Navarro, E., Peucker, B., Quan, M., Clark, A. C., & Jipson, J. (2010). Wi-Fi Localization Using RSSI Fingerprinting.” Citeseer, 2010.
- [3] Le Dortz, N., Gain, F., & Zetterberg, P. (2012). WiFi fingerprint indoor positioning system using probability distribution comparison. In 2012 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), 2012, pp. 2301–2304.
- [4] Lashkari, A. H., Parhizkar, B., & Ngan, M. N. A. (2010). “WIFI-based indoor positioning system. In Second International Conference on Computer and Network Technology, 2010, 76–78.
- [5] Qureshi, U. M., Umair, Z., & Hancke, G. P. (2019). Evaluating the implications of varying Bluetooth low energy (BLE) transmission power levels on wireless indoor localization accuracy and precision. *Sensors*, 19(15), 3282
- [6] Altini, M., Brunelli, D., Farella, E., & Benini, L. (2010) Bluetooth indoor localization with multiple neural networks. In IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010, 2010, pp. 295–300.
- [7] Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* , 21(3), 2568–2599.
- [8] Cheung, K. C., Intille, S. S., & Larson, K. (2006). An inexpensive bluetooth-based indoor positioning hack. In *Proceedings of UbiComp, 2006*, vol. 6.
- [9] Hsiao, C.-C., & Huang, P. (2008). Two practical considerations of beacon deployment for ultrasound-based indoor localization systems. In 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (suc 2008), 2008, pp. 306–311.

- [10] Sainjeon, F., Gaboury, S., & Bouchard, B. (2016). Real-Time Indoor Localization in Smart Homes Using Ultrasound Technology. In Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, 2016, pp. 1–4.
- [11] Hammoud, A., Deriaz, M., & Konstantas, D. (2016). Robust ultrasound-based room-level localization system using cots components. In 2016 Fourth international conference on ubiquitous positioning, indoor navigation and location based services (UPINLBS), 2016, pp. 11–19.
- [12] Runge, A., Baunach, M., & Kolla, R. (2011). Precise self-calibration of ultrasound based indoor localization systems. In. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2011, 1–8.
- [13] Luo, J., Fan, L., & Li, H. (2017). Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(4), 2871–2893.
- [14] Huynh, P., & Yoo, M. (2016). VLC-based positioning system for an indoor environment using an image sensor and an accelerometer sensor. Sensors, 16(6), 783.
- [15] Xiao, Y. Ou, Y., & Feng, W. (2017) Localization of indoor robot based on particle filter with EKF proposal distribution. In 2017 IEEE international conference on cybernetics and intelligent systems (CIS) and IEEE conference on robotics, automation and mechatronics (RAM), 2017, pp. 568–571.
- [16] K. S Arun, T. S. Huang, D. Blostein, 1987. Latest-Squares Fitting of two 3D Point Sets. IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine intelligence, ISSN 0162-8828, 1987, vol. PAMI-9, no.5, p698-700.
- [17] G. Dudek, M. Jenkin, 2010. Computational Principles of Mobile Robotics. 2nd edition, Cambridge University Press, 2010, p244-245, ISBN 978-0-521-69212-0.
- [18] Mazi R., Lokalizace pro autonomní systémy. Disertační práce, České vysoké učení technické, Praha, 2007.
- [19] H. Durant-Whyte, T. Bailey. 2006. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part 1 The Essential Algorithms. IEEE Robotics and Automation Magazine. ISSN 1070-9932, 2006. vol.13, no2., p.99-110.
- [20] Marvelmind Indoor Navigation System Operating manual, v2022_08_24, URL: https://marvelmind.com/pics/marvelmind_navigation_system_manual.pdf
- [21] Kiran Palla, Creating Map using Laser Scanner and Gmapping, 2018, URL: <https://kiranpalla.com/autonomous-navigation-ros-differential-drive-robot-simulation/creating-map-using-laser-scanner-and-gmapping/>