

DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.55-61>

УДК 621.86

О.М. Семчак<https://orcid.org/0000-0002-4480-2393>*Військова академія (м. Одеса), Україна*

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО ЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ НАВІГАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ З ФІЛЬТРОМ ЧАСТИН РАО-БЛЕКВЕЛЛА

Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій та робототехніки, ставить перед нами завдання щодо адаптації застарілих навігаційних систем військової техніки до вимог сучасності. Існуючі навігаційні системи широко застосовуються як у військовій так і в цивільній сферах.

Аналіз існуючих навігаційних систем показав ряд негативних проблем, що стало приводом для проведення роботи в створенні навігаційної системи яка могла б відповідати наступним вимогам: низькі фінансові затрати на виробництво, мобільність, невеликі габаритні розміри, точність визначення координат та найважливіше це автономність. Найбільш ефективними методами позиціонування автономних рухомих об'єктів є метод розрахунку координат EKF-SLAM з фільтром частин Рао-Блеквелла.

В даній статті представлений комбінований метод визначення поточного значення координат навігаційною системою з фільтром частин Рао-Блеквелла. Фільтр Рао-Блеквелла для картографування поступово обробляє спостереження і свідчення одометра в міру їх надходження. Даний процес виконується шляхом поновлення набору зразків, які представляють апостеріор на карті і траєкторію руху транспортного засобу.

Пропонований в роботі шлях модифікації відомих математичних співвідношень фільтрів Калмана з точки зору їх адаптації до особливостей алгоритмічної та програмної реалізації в бортових ЕОМ забезпечує економія пам'яті бортової ЕОМ і зменшення необхідного обчислювального ресурсу.

Зауважено, що алгоритми реалізації SLAM навігації змінені запропонованим шляхом використовують меншу кількість частинок, ніж методи, засновані тільки на частотному фільтрі. Помилка початкового обчислення координат орієнтирів зводиться до мінімуму і не накопичується з часом в математичному сенсі.

Ключові слова: Автономний рухомий об'єкт, Simultaneous Localization And Mapping, EKF-SLAM, GMapping, фільтр частинок Рао-Блеквелла, коваріація, прогнозування параметрів, позиціонування, алгоритм орієнтації, фільтр Калмана.

Постановка проблеми

Основними функціональними можливостями, які повинен мати автономний рухомий об'єкт (далі АРО), що орієнтований на вирішення різноманітних прикладних задач по збору різного роду інформації та виконанню складних технологічних операцій в різноманітному середовищі, на відкритій місцевості або у складних міських умовах, одна з ключових задач пов'язана з необхідністю точного визначення координат точки свого положення та побудови карти місцевості.

Існують дві головні проблеми, які виникають при вирішенні завдання SLAM [9, 10].

Перша з них – проблема збіжності. Вона безпосередньо пов'язана з точністю обчислень. Будь-які датчики і системи одометра мають певну модель помилки. Проте, точно визначити цю модель найчастіше не представляється можливим, тому користуються різного роду спрощеннями, які тягнуть за собою неточності в побудові карти. Використання методу представлення чисел як масивів в бортовій ЕОМ частково вирішує цю проблему за рахунок виключення помилок представлення чисел в двійковій системі обчислення та помилок алгоритмів розрахунків з обмеженою розрядною сіткою [6, 7].

Існує і друга проблема – обчислювальна складність алгоритмів. Спробами розв'язання цієї проблеми є створення алгоритмів, які асимптотично вирішують завдання за логарифмічний час [11, 12]. Проте, структурна складність навколишнього простору така, що навіть при такій складності обчислень не завжди вдається вирішувати завдання в прийнятний час (особливо, це стосується літаючих роботів, що рухаються з великими швидкостями) [12].

Виходить, що не дивлячись на те, що сенсори АРО, дозволяють отримувати інформацію за будь-яких умов, АРО не завжди може впоратися з обсягом і якістю одержуваної інформації, щоб орієнтуватися.

Таким чином постає завдання визначення шляхів зменшення похибок розрахунків координат бортовими ЕОМ автономного рухомого об'єкту для реалізації алгоритмів EKF-SLAM навігації.

Завдання може бути вирішене критичним аналізом математичних співвідношень відомих алгоритмів EKF-SLAM навігації з точки зору їх алгоритмічної та програмної реалізації [13].

Аналіз останніх досягнень і публікацій

При реалізації відомих алгоритмів проведення арифметичних операцій в наслідок округлень результату обчислень, обумовлених представленням двійкових чисел в форматі з плаваючою комою, вже при складанні систем рівнянь та обчисленні поліномів 4 ступеню починають накопичуватися помилки комп'ютерних розрахунків, які приводять до виродження матриць і унеможливають отримання результату обчислень [5, 6, 7]. Ці помилки пов'язані з обмеженою довжиною розрядної сітки EOM (що зазвичай дорівнює 32 або 64 біта). Для вирішення зазначеної проблеми за запропоновано метод представлення чисел як масивів [5, 6].

Для вивчення особливостей алгоритмічної та програмної реалізації представляє інтерес аналіз математичних співвідношень реалізації варіантів фільтру Калмана проведений в [8]. Саме у згаданій роботі проведено вивчення можливостей використання різноманітних варіантів відомих фільтрів Калмана для оцінки стану апіорі відомої динамічної системи. За своїм змістом це завдання схоже з завданням навігації АРО.

Постановка завдання

Метою даної статті, за рахунок комбінації декількох рішень методу SLAM, розробити комбінований метод позиціонування рухомого автономного рухомого об'єкту на місцевості з використанням фільтра частинок Рао-Блеквелла, як в GMapping і розширений фільтр Калмана, як в EKF-SLAM. Щоб забезпечити економію пам'яті і зменшення необхідного обчислювального ресурсу

Виклад основного матеріалу дослідження

Оцінка стану автономного рухомого об'єкту досягається шляхом фільтрації частинок. Генерується безліч гіпотез, що є кінцевим числом, які являють собою передбачуване місце розташування робота. Кожен значущий елемент карти, тобто орієнтир, в кожній частинці може бути оцінений з використанням розширених фільтрів Калмана, обумовлених позицією частинок АРО. А коефіцієнт важливості частинок розраховується для визначення ймовірності попадання певної частки в остаточний набір, який буде представляти реальне місце розташування.

Нижче наведені основні етапи запропонованого алгоритму орієнтації на місцевості для автономних рухомих об'єктів:

- 1) оновлення моделі руху АРО, шляхом визначення для кожної частки нової позиції в наступний момент часу;
- 2) оновлення оцінок спостерігаємих орієнтирів (за допомогою розширеного фільтра Калмана - EKF);
- 3) обчислення важливості кожної частки;
- 4) повторна вибірка частинок.

Набір частинок x на кроці t обчислюється поетапно з набору частинок x_{t-1} в момент $t-1$, спостереження z і управління u . Першим кроком алгоритму є імовірнісна генерація припущень про позицію АРО в момент часу t для кожної частки x_{t-1}^k . Це припущення виходить шляхом вибірки з ймовірнісної моделі руху:

$$x_t^k \sim p(x_t | u_t, x_{t-1}^k) \quad (1)$$

На наступному кроці кожен орієнтир на карті оцінюється за допомогою розширеного фільтра Калмана. Всі EKF орієнтирів обумовлені маршрутами АРО, причому кожна частинка в фільтрі часток має власний набір EKF.

Якщо орієнтир виявлений вперше, то необхідно:

- виконати ініціалізацію позиції орієнтира на основі вимірів і поточної позиції частки;
- знайти матриця Якобі;
- сформувати EKF для даного орієнтиру.

В іншому випадку:

- отримати очікувані вимірювання і матрицю Якобі;
- обчислити коваріацію вимірювань;
- розрахувати посилення Калмана;
- обчислити помилку між фактичним і прогнозованим наглядом;
- оновити середнє значення і коваріацію ЕКФ.

Більш детальний опис вище зазначених дій проводиться наступним чином.

Кожна ітерація фільтра Калмана ділиться на дві фази: екстраполяція (прогноз) і корекція. Зазвичай ці дві фази чергуються: екстраполяція проводиться за результатами корекції до наступного спостереження, а корекція проводиться спільно з доступними на наступному кроці спостереженнями [1].

Під час екстраполяції фільтр отримує попередню оцінку стану системи $\hat{x}_{k|k-1}$ на поточний крок по підсумковій оцінці стану з попереднього кроку. Цю попередню оцінку також називають апіорної оцінкою стану, так як для її отримання не використовуються спостереження відповідного кроку.

Етап екстраполяції представлений рівняннями наступного вигляду:

- передбачена оцінка стану

$$\hat{x}_{k,k-1} = f\left(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k,k-1}\right) \quad (2)$$

- коваріація передбаченої оцінки

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (3)$$

У фазі корекції апіорна екстраполяція доповнюється відповідними поточними вимірами для корекції оцінки. Скоригована оцінка також називається апостеріорної оцінкою стану, або просто оцінкою вектору стану \hat{x}_k матриця переходу F_{k-1} котра використовується в формулах (1-2) виглядає наступним чином:

$$F_{k-1} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{\hat{x}^{k-1|k-1}, U_{k-1}} \quad (4)$$

Етап корекції описується рівняннями наступного вигляду:

- нововведення, або відхилення вимірювання:

$$\hat{y}_k = z_k - h(\hat{x}_{k|k}) \quad (5)$$

- коваріація нововведення (або відхилення):

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (6)$$

- близький до оптимального передавальний коефіцієнт Калмана:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T + S_k^{-1} \quad (7)$$

- корекція попередньо отриманої екстраполяції вектору стану (уточнена оцінка стану):

$$\hat{x}_{k,k} = \hat{x}_{k,k-1} + K_k \hat{y}_k \quad (8)$$

- коваріація уточненої оцінки:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (9)$$

Матриця спостереження H_k котра використовується в формулах (6-7, 8) виглядає таким чином:

$$H_k = \left. \frac{dh}{dx} \right|_{\hat{x}^{k|k-1}} \quad (10)$$

ЕКФ-SLAM фільтр Калмана обчислює стан системи в момент k станом $k-1$. АРО під час руху в якості точок інтересу вибирає мітки, відносно яких визначається його положення в просторі. Мітками повинні бути окремі унікальні об'єкти досліджуваного простору, які здатний розпізнати алгоритм.

Робота фільтра розділяється на два етапи: екстраполяція – прогноз стану k системи станом $k-1$ і корекція – обчислення відхилення отриманого спостереження від передбаченого спостереження [2].

На рис. 1 показано графічну модель алгоритму ЕКФ-SLAM. Положення АРО (координата X , координата Y та орієнтація АРО) зображуються колами, що містять в собі x з індексом. Кола містять u з індексом означають команду переміщення до місця знаходження. Коло з m позначають орієнтир, а кола, що містять z з індексом, призначені для вимірювань, означають вимірювання сенсорів орієнтирів, отриманих від АРО.

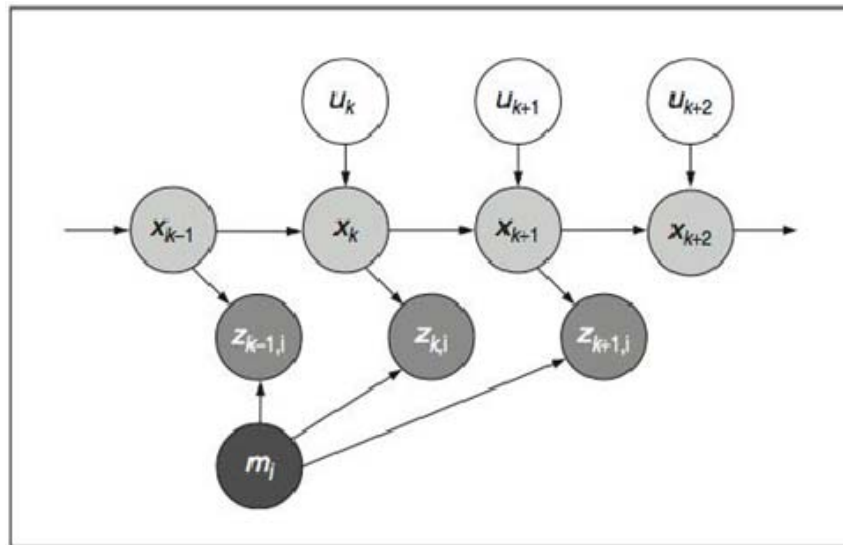


Рис. 1. Графічна модель алгоритму ЕКФ-SLAM

Асоціація даних (пошук вже обстежених міток) дозволяє коригувати положення АРО, зменшуючи помилку, викликану похибкою роботи датчиків. Результат покращиться, якщо корекцію положення АРО здійснювати по більшій кількості міток.

В результаті виконання даного кроку алгоритму кожна частка матиме N орієнтирів, представлених за допомогою ЕКФ.

Для нормалізації ваги частинок використовується формула, отримана з фільтра Рао-Блеквелла

$$w^{(i)} = \frac{p(x_t^{(i)} | z_{1:t}, u_{0:t})}{\pi(x_t^{(i)} | z_{1:t}, u_{0:t})}$$

$$w^i = |2\pi Q|^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - \hat{z}^i)^T Q^{-1}(z_t - \hat{z}^i)\right\} \quad (11)$$

Етап повторної вибірки є важливим аспектом, який робить основний вплив на продуктивність фільтра частинок. Під час повторної вибірки частки з низькою вагою зазвичай замінюються зразками з вищою вагою. З одного боку, необхідна повторна вибірка, оскільки використовується тільки кінцеве число частинок. З іншого боку, етап повторної вибірки може видалити хороші зразки з набору зразків, викликаючи виснаження частинок. Відповідно, важливо знайти критерій, коли виконувати етап повторної вибірки. В роботі [3] введено так зване ефективне число частинок N_{eff} щоб оцінити, наскільки добре поточний набір часток представляє справжній апостеріор. Ця величина обчислюється наступним чином:

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w^i)^2} \quad (12)$$

У запропонованому алгоритмі було вирішено, що кожен раз, коли N_{eff} падає нижче заданого порогу $N/2$, де N – число часток, буде проводитися повторна вибірка. Цей підхід значно знижує ризик заміни хороших частинок, оскільки кількість операцій повторної вибірки скорочується, а операції повторної вибірки виконуються тільки при необхідності.

Процес повторної вибірки виконується відповідно до так званої вибіркою з низькою дисперсією, представленої в роботі [4].

Таким чином забезпечується економія пам'яті і зменшення необхідного обчислювального ресурсу. Розроблений алгоритм використовує меншу кількість частинок, ніж методи, засновані тільки на частотному фільтрі. А помилка початкового обчислювати координати орієнтирів зводиться до мінімуму і не накопичується з часом.

Список використаних джерел

1. Extended Kalman filter. Wikipedia. [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter – 29.12.2017
2. ROBOT MAPPING AND EKF SLAM. [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://slideplayer.com/slide/5983202/> – 10.01.2018
3. J.S. Liu. Metropolized independent sampling with comparisons to rejection sampling and importance sampling. *Statist. Comput.*, 6:113–119, 1996 – 15.05.2018
4. Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents) / S.Thrun, W.Burgard, D.Fox // The MIT Press, 2005. P. 84–89. – 10.06.2018
5. Левченко А.А., Войтенков Р.М. Анализ предельных точностей вычислений в информационных системах с представлением чисел с плавающей запятой // Збірка тез доповідей 3-го науково-технічного семінару «Перспективні шляхи розвитку інформаційних систем прицілювання та самонаведення високоточного озброєння РВіА» – Львів: АСВ, 2012. – С. 119.
6. Levchenko A. Arithmetic operation for binari numbers represettated as arrays // Modern engineering and innovative technologies / International periodic scientific journal – Karlsruhe, Germany: – 2019. – №9, part 1. – p. 51-59.
7. Левченко А.А., Войтенков Р.М. Метод представлення чисел для програмних засобів гарантоздатних інформаційних технологій систем підтримки прийняття рішень для керування станом ОБТ // Збірник тез доповідей 19-ї науково-практичної конференції «Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення». – Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. – С. 142-143.
8. Кучерский Р.В., Манько С.В. Известия ЮФУ. Технические Науки // Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота 2012 № 3 (128) С. 13-22.
9. Semchak O., Levchenko A. Disadvanteges of computer implementation of SLAM-metods of local navigation autonovus mobile objects // SWorld journal // International periodic scientific journal – Sofia, Bulgaria: – 2019. – №2, part 2. – p. 108-115.
10. Aulinas J. The SLAM Problem: A Survey // Proceedings of the 2008 Conference on Artificial Intelligence Research & Development. 2008. P. 363–371. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.163.6439>
11. Любкевич К.О., Локалізація мобільного робота на місцевості. /К.О. Любкевич, Ю.О. Гунченко // Збірник матеріалів XIV Всеукраїнської конференції студентів і молодих науковців “Інформатика, інформаційні системи та технології”. – Одеса – 2017. – С. 188.
12. Methods and technologies of monitoring of the position of a mobile object in space: Proceedings / Nechyporenko O.V. et. al. // Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2018). Dnipro: Balans-klub, 2018. P. 193–195.
13. Levchenko A. Features of implementation of information technology for provision of numerical value of parameters // Modern engineering and innovative technologies // International periodic scientific journal – Karlsruhe, Germany: – 2019. – №10, part 1. – p.36-42.

References

1. Extended Kalman filter. Wikipedia. *en.wikipedia.org* Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter [in English].
2. ROBOT MAPPING AND EKF SLAM. *slideplayer.com* Retrieved from: <https://slideplayer.com/slide/5983202/> [in English].
3. Liu, J.S. (1996). Metropolized independent sampling with comparisons to rejection sampling and importance sampling. *Statist. Comput.*, 6,113– 119 [in English].
4. Thrun, S., Burgard, W., Fox D. (2005). Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents). *The MIT Press*, 84–89 [in English].
5. Levchenko, A.A., Voitenkov, R.M. (2012). Analiz predelnyih tochnostey vyichisleniy v informatsionnyih sistemah s predstavleniem chisel s plavayushey zapyatoy [Analysis of the limiting accuracy of calculations in information systems with the representation of floating point numbers]. *Zbirka tez dopovidei 3-ho naukovo-tekhnichnoho seminaru «Perspektyvni shliakhy rozvytku informatsiinykh system prysiliuvannia ta samonavedennia vysokotochnoho ozbroiennia RViA» – Collection of abstracts of reports of the 3rd scientific and technical seminar «Prospective ways of development of information systems of aiming and homing of high-precision weapons RViA»* (p. 119). Lviv: ASV [in Russian].
6. Levchenko, A. (2019). Arithmetic operation for binari numbers repressetated as arrays. *International periodic scientific journal Modern engineering and innovative technologies*, №9, rart 1, 51-59 [in English].
7. Levchenko, A.A., Voitenkov, R.M. (2012). Metod predstavlennia chysel dlia prohramnykh zasobiv harantozdatnykh informatsiinykh tekhnolohii system pidtrymky pryiniattia rishen dlia keruvannia stanom OVT [Method of representation of numbers for software of guaranteeable information technologies of decision support systems for management of the state of weapons]. *Zbirnyk tez dopovidei 19-i naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia informatsiinykh system spetsialnoho pryznachennia» – Collection of abstracts of the 19th scientific-practical conference «Problems of creation, development and application of special purpose information systems»*. (pp. 142-143). Zhytomyr: ZhVI NAU [in Ukrainian].
8. Kucherskyi, R.V., Manko, S.V. (2012). Algoritmyi lokalnoy navigatsii i kartografii dlya bortovoy sistemyi upravleniya avtonomnogo mobilnogo robota [Local navigation and mapping algorithms for the on-board control system of an autonomous mobile robot]. *Yzvestyia YuFU. Tekhnicheskyye Nauky – Izvestia SFedU. Technical science*, № 3 (128),13-22 [in Russian].
9. Semchak, O., Levchenko, A. (2019). Disadvanteges of computer implementation of SLAM-methods of local navigation autonovus mobile objects. *International periodic scientific journal SWorld journal*, №2, rart 2, 108-115 [in English].
10. Aulinas, J. (2008). The SLAM Problem: A Survey. *Proceedings of the 2008 Conference on Artificial Intelligence Research & Development*. (pp. 363–371). URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.163.6439> [in English].
11. Liubkevych, K.O., & Hunchenko, Yu.O. (2017). Lokalizatsiia mobilnogo robota na mistsevosti [Localization of mobile robot in the field]. *Zbirnyk materialiv XIV Vseukrainskoi konferentsii studentiv i molodykh naukovtsiv «Informatyka, informatsiini systemy ta tekhnolohii» – Proceedings of the XIV All-Ukrainian Conference of Students and Young Scientists «Informatics, Information Systems and Technologies»*. (p. 188). Odesa [in Ukrainian].
12. Nechyporenko, O.V. et.al. (2018). Methods and technologies of monitoring of the position of a mobile object in space: Proceedings. *Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2018)*. (pp. 193-195). Dnipro: Balans-klub [in English].
13. Levchenko, A. (2019). Features of implementation of information technology for provision of numerical value of parameters. *International periodic scientific journal Modern engineering and innovative technologies*, №10, rart 1, 36-42 [in English].

Рецензент: Максименко Ю.А., кандидат технічних наук, Військова академія (м. Одеса), Україна

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ КООРДИНАТ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ С ФИЛЬТРОМ ЧАСТИЦ РАО-БЛЕКВЕЛА

А. Семчак

Современные тенденции развития информационных технологий и робототехники, ставят перед нами задачу относительно адаптации устаревших навигационных систем военной техники к требованиям современности. Существующие навигационные системы широко применяются как в военной, так и в гражданской сферах.

Анализ существующих навигационных систем показал ряд негативных проблем, что стало поводом для проведения работы в создании навигационной системы которая могла бы отвечать следующим требованиям: низкие финансовые затраты на производство, мобильность, небольшие габаритные размеры, точность определения координат и самую важную – автономность. Наиболее эффективными методами позиционирования автономных подвижных объектов является метод расчета координат EKF-SLAM с фильтром частей Рао-Блеквелла.

В данной статье представлен комбинированный метод определения текущего значения координат навигационной системой с фильтром частей Рао-Блеквелла. Фильтр Рао-Блеквелла для картографирования постепенно обрабатывает наблюдение и свидетельство одометра в меру их поступления. Данный процесс выполняется путем возобновления набора образцов, которые представляют апостериор на карте и траекторию движения транспортного средства.

Предлагаемый в работе путь модификации известных математических соотношений фильтров Калмана с точки зрения их адаптации к особенностям алгоритмической и программной реализации в бортовых ЭВМ обеспечивает экономию памяти бортовой ЭВМ и уменьшения необходимого вычислительного ресурса. Замечено, что алгоритмы реализации SLAM навигации изменены предложенным путем используют меньшее количество частиц, чем методы, основанные только на частотном фильтре. Ошибка начального вычисления координат ориентиров сводится к минимуму и не накапливается со временем в математическом смысле.

Ключевые слова: Автономный подвижной объект, Simultaneous Localization And Mapping, EKF-SLAM, Gmapping, фильтр частиц Рао-Блеквелла, ковариация, прогнозирование параметров, позиционирования, алгоритм ориентации, фильтр Калмана.

COMBINED METHOD FOR DETERMINING THE CURRENT VALUE OF COORDINATES BY A NAVIGATION SYSTEM WITH A RAO-BLACKWELA PARTICLE FILTER

O. Semchak

Modern trends in the development of information technology and robotics, sets before us the task of adapting obsolete navigation systems of military equipment to the requirements of our time. Existing navigation systems are widely used in both military and civilian spheres

The analysis of existing navigation systems showed a number of negative problems, which became the reason for work to create a navigation system that could meet the following requirements: low financial costs for production, mobility, small overall dimensions, accuracy in determining coordinates and the most important - autonomy. The most effective methods for positioning autonomous moving objects is the method for calculating the coordinates of the EKF-SLAM with the Rao-Blackwell parts filter.

This article presents a combined method for determining the current coordinate value by a navigation system with a Rao-Blackwell parts filter. The Rao-Blackwell filter for mapping progressively processes observation and odometer evidence as they become available. This process is accomplished by resuming a set of samples that represent the posterior on the map and the vehicle's path.

The proposed way of modifying the well-known mathematical relations of Kalman filters from the point of view of their adaptation to the peculiarities of algorithmic and software implementation in onboard computers provides savings in onboard computer memory and reduces the required computing resource. It is noticed that the algorithms for the implementation of SLAM navigation are changed in the proposed way using a smaller number of particles than methods based only on the frequency filter. The error in the initial calculation of the coordinates of landmarks is minimized and does not accumulate over time in a mathematical sense.

Keywords: Autonomous mobile object, Simultaneous Localization And Mapping, EKF-SLAM, Gmapping, Rao-Blackwell particle filter, covariance, parameter prediction, positioning, orientation algorithm, Kalman filter.