

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАВІГАЦІЇ ТА ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Б.О. Єрмоленко

аспірант кафедри програмованої електроніки електротехніки та телекомунікацій,
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

Анотація

Вступ. Автономні надводні судна (АНС) та їх застосування у дослідженнях різної складності є актуальною галуззю досліджень. Автономні надводні судна – це пристрої, здатні самостійно рухатись водним середовищем і виконувати різні завдання та проводити збір даних. Сфери застосування цих засобів пов'язані з водними ресурсами. Залучення АНС у різних дослідницьких місіях демонструє інтерес наукової спільноти до подібних платформ. В океанографії надводні дрони можуть допомогти збирати дані про температуру води, солоність, рівень кисню, хвильову активність та інші параметри. Це надає вченим більш повну картину про океанські явища та динаміку змін, що сприяє покращенню розуміння кліматичних процесів та екосистем океану. Подальша розробка та вдосконалення суден важливе питання та має велике практичне значення для галузей пов'язаних з водними ресурсами. **Метою** статті є проведення дослідження методів навігації та особливостей руху АНС, проблем та шляхів підвищення ефективності руху по заданому маршруту. Сфокусувати увагу на процесі планування шляху АНС як важливого етапу, на якому базується рух автономного судна, та провести огляд алгоритмів оптимізованого руху як аспекту планування шляху для знаходження потенційних шляхів покращення ефективності роботи. **Результати.** В статті проведено огляд методів навігації та особливостей руху АНС, основних структурних елементів та систематизовано основні проблеми та виклики, які наразі існують. Також проведений аналіз процесу планування шляху АНС як важливого етапу, який лежить в основі руху АНС по заданому маршруті. Досліджено важливий аспект планування шляху, а саме алгоритми оптимізованого руху як потенційних шляхів підвищення ефективності руху. На основі дослідження було сформовано критерії оптимальності, урахування яких у роботі алгоритму дасть змогу покращити будівництво шляху та поліпшить загальну ефективність під час переміщення АНС. **Висновки.** Дослідження та розробка Автономних надводних суден продовжується і надалі. Зацікавленість у подібних суднах обумовлена широкими можливостями, які дозволяють застосувати їх у різних дослідницьких місіях. Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що ефективний рух АНС під час виконання завдань – це комплексний процес, в основі якого лежить злагоджена робота навігаційної системи, правильно спланований маршрут та врахування зовнішніх факторів впливу. Розвиток алгоритмів оптимізованого

руху дозволяють забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Подальше дослідження та впровадження алгоритмів оптимізації руху АНС відкриває нові перспективи для створення повністю автономних засобів нового покоління.

Ключові слова: автономні надводні судна, навігація, дистанційне керування, електродвигун, судно, автопілот, планування шляху, алгоритм оптимізованого руху.

ANALYSIS OF THE NAVIGATION AND PATH PLANNING PROCESS OF AN AUTONOMOUS SURFACE VESSEL

В.О. Yermolenko

Postgraduate Student at the Department of Programmable Electronics,
Electrical Engineering and Telecommunications,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-0353-891X

Summary

Introduction. Autonomous surface vessels (UAVs) and their use in research of various complexity is an actual field of research. Autonomous surface vessels are devices capable of independently moving through the water environment and performing various tasks and collecting data. The spheres of application of these means are related to water resources. The involvement of ANS in various research missions demonstrates the interest of the scientific community in such platforms. In oceanography, surface drones can help collect data on water temperature, salinity, oxygen levels, wave activity, and other parameters. This provides scientists with a more complete picture of ocean phenomena and dynamics of change, contributing to a better understanding of climate processes and ocean ecosystems. Further development and improvement of vessels is an important issue and has great practical significance for industries related to water resources. **The purpose** of the article is to conduct a study of navigation methods and features of ANS movement, problems and ways to increase the efficiency of movement along a given route. Focus attention on the ANS path planning process as an important stage on which autonomous vessel movement is based, and conduct a review of optimized motion algorithms as an aspect of path planning, in order to find potential ways to improve operational efficiency. **Results.** The article provides an overview of navigation methods and features of ANS movement, main structural elements, and systematizes the main problems and challenges that currently exist. An analysis of the ANS route planning process was also carried out, as an important stage that underlies the movement of the ANS along the given route. An important aspect of path planning, namely algorithms of optimized movement, as a potential way to improve movement efficiency, has been studied. On the basis of the research, optimality criteria were formed, taking into account of which in the algorithm's work will allow to improve the construction of the path, and improve the overall efficiency during the movement of the ANS. **Conclusions.** Research and development of Autonomous Surface Vessels continues. Interest in such vessels is due to the wide possibilities that allow them to be used in various research missions. Taking into account the above, it can be concluded that the effective movement of the ANS during the execution of tasks is a complex process based on the coordinated

operation of the navigation system, a correctly planned route, and consideration of external influencing factors. The development of algorithms for optimized movement allows for flexibility and adaptability to changing conditions, which can provide the best solutions in real time. Further research and implementation of ANS traffic optimization algorithms opens up new perspectives for the creation of fully autonomous vehicles of a new generation.

Key words: *autonomous surface vessels, navigation, remote control, electric motor, vessel, autopilot, path planning, optimized motion algorithm.*

Вступ. Використання автономних надводних суден (АНС), зокрема надводних дронів, які рухаються по заданій траєкторії, є актуальною галуззю дослідження для сучасної науки, тому що знаходить практичне застосування в різних сферах, включаючи наукові дослідження різного характеру, безпеку, екологію та ін. Автономні надводні судна являють собою пристрої, здатні самостійно рухатись водним середовищем і виконувати різні завдання та проводити збір даних. Це грає важливу роль для проведення наукових досліджень різного характеру.

Традиційно збір даних відбувається за допомогою людських експедицій на судах або використанням стаціонарних приладів. Однак цей підхід може бути обмежений з точки зору затрат, доступу до віддалених районів і можливостей спостереження. Автономні надводні судна дозволяють вирішити ці обмеження, оскільки вони можуть працювати відносно довгий час, автоматично пристосовуються до зміни умов та можуть працювати у різних місцевостях. За допомогою більш ефективного, компактного, комерційно-доступного та навігаційного обладнання, включаючи глобальні системи позиціонування, а також більш потужні та надійні системи бездротового зв'язку, розширило можливості АНС як інструменту досліджень. Їх можна програмувати для руху по заданій траєкторії або контролювати за допомогою супутникової навігації, аналізу даних сенсорів і штучного інтелекту. Наприклад, в океанографії надводні дрони можуть допомогти збирати дані про температуру води, солоність, рівень кисню, хвильову активність та інші параметри. Це надає вченим більш повну картину про океанські явища та динаміку змін, що сприяє покращенню розуміння кліматичних процесів та екосистем океану.

Постановка проблеми. Широкий спектр сфер використання та активний розвиток загальної концепції зробив АНС важливим інструментом досліджень різної складності. Створення повністю автономних АНС питання, яке широко досліджується багатьма розробниками. Однак ефективне функціонування АНС нерозривно пов'язане із навігацією та завданням планування руху. Постійні зміни динамічних умов середовища, потреба в енергозбереженні, забезпечення безпеки та ефективного виконання завдань ставлять перед процесом руху та планування шляху значні виклики. Вплив цих проблем не дозволяє ефективно виконувати рух по заданому маршруту, і тому загальна продуктивність роботи АНС сильно падає.

Формулювання цілей статті. Метою статті є проведення дослідження методів навігації та особливостей руху АНС, проблем та шляхів підвищення ефективності руху по заданому маршруту. Сфокусувати увагу на процесі планування шляху АНС як важливого етапу, на якому базується рух автономного судна, та провести огляд алгоритмів оптимізованого руху як аспекту планування шляху, задля знаходження потенційних шляхів покращення ефективності роботи.

Виклад основного матеріалу. Вплив кліматичних змін на водне середовище, проблеми охорони навколишнього середовища та вимоги до людських ресурсів призвели до попиту зі сторони військових, наукових та цивільних спільнот інноваційних пристроїв нового класу – автономних надводних суден (дронів), також відомих як Безпілотні надводні судна.

За останні десятиліття велика кількість науковців, розробників, дослідних центрів розробляли АНС для використання у різних місіях та дослідженнях [1].

АНС активно використовуються у різних сферах, пов'язаних з водними ресурсами. Серед головних галузей можна відокремити: наукові дослідження – батиметрична зйомка, дослідження діяльності океану, проведення тестувань подальших розробок АНС; екологічні місії – вимірювання стану забруднення, аналіз стану води, екологічний моніторинг навколишнього середовища, аналіз для попередження катастроф, допоміжне прогнозування; розвідка ресурсів океану – розвідка родовищ газу та нафти, будівництво та обслуговування морських платформ; військове використання – охорона та спостереження портової та берегової зони, пошукові та рятувальні роботи, розмінування, та дрони для інших військових потреб [2–5].

Широкий спектр сфер застосування призвів до створення великої кількості зразків різної форми та розмірів і різних корисних навантажень залежно від конкретного завдання. Для чіткого розуміння проблем, які розглядаються у статті, важливо визначити основні елементи, які повинні бути включені до кожного АНС: корпус та інші структурні елементи – класичний жорсткий корпус, катамарани, тримарани, каяки [6; 7]; силова установка і кермова система – за управління та рух у АНС відповідає рульова та гвинтова або водометна установка. Гвинтова установка на основі двигуну внутрішнього згоряння або електродвигуна; система наведення, навігації та контролю (GNC) – система, завдяки якій відбувається контроль за рухом у просторі під час роботи та обміном інформацією в середині самого судна. Використовуються системи GPS, інерційні вимірювальні пристрої (IMU) і комп'ютерні системи для роботи автопілоту, комунікації з пунктами управління задля стеження не тільки за рухом, а також за іншим обладнанням, яке встановлене на АНС [8]; обладнання для збору даних – до складу зазвичай входять навігаційні модулі та периферійне обладнання: камери, гідролокатори, сонари [9].

Методи навігації та наведення АНС. Безпечне та ефективне керування АНС значною мірою залежить від відповідної навігаційної систем, оцінки стану, аналізу навколишнього середовища та можливостей реакції на ситуацію. Маневрування по заданій траєкторії потребує високої точності керування, виникає потреба достатнього запасу працездатності, проблема обмежених енергоресурсів потребує використання якісних електронних та механічних компонентів, а також енергоефективних алгоритмів керування. За рух під час роботи відповідає система навігації та наведення. Робота навігаційних систем АНС складається з таких частин:

1) сприйняття середовища – це комплексний аналіз, який складається з обстеження морської поверхні, відстеження та знаходження об'єктів та уникнення перешкод. Активне сприйняття середовища використовує візуальні засоби отримання інформації, такі як камери, прилади інфрачервоного бачення. Активний метод використовує такі технології, як сонари, радари, Lidar [10];

2) аналіз стану – процес, який дає повну інформацію про загальне положення АНС, дає змогу керувати швидкістю та прискоренням. Інструментом функціонування є системи GPS та IMU або інші датчики. Але в процесі експлуатації виникає проблема впливу зовнішніх чинників, а також похибки в роботі датчика. Все це впливає на точність GPS та IMU систем під час оцінювання положення та орієнтації [11];

3) проведення зондування – саме отримання чіткої інформації від датчиків, дозволяє ефективно обробляти її;

4) ситуаційна обізнаність – важливий етап під час розробки АНС з підвищеним рівнем автономності. Загальний принцип роботи пов'язаний з відстеженням та виявленням змін на рівні об'єкта для подальшого знаходження цілей, підтвердження їх місцезнаходження та розпізнавання змін у навколишньому середовищі під час руху [9]. Частковим рішенням для подібного сценарію є застосування технології Симуляції, локалізації та картографування (SLAM).

Розробка стратегій контролю орієнтується на різні цілі, які можна загалом класифікувати у чотири категорії:

1. Відстеження траєкторії: автономне судно керується таким чином, щоб відстежувати бажану часову прив'язку, одночасно дотримуючись попередньо визначених просторових обмежень. Для повністю динамічних АНС ця проблема зараз достатньо вивчена.

2. Регулювання заданої точки: базовий контрольний елемент, який дає змогу узгодити орієнтацію та положення АНС під час руху.

3. Рух за заданим маршрутом: АНС рухається за запланованим шляхом, при цьому триматися заданої швидкості та слідкувати за траєкторією.

4. Маневрування на маршруті: відноситься до руху за заданим маршрутом. Ставиться дві головні задачі. Перша – геометрична, яка забезпечує рух АНС в умовах обмежень маневреності. Друга – це динамічне завдання, що вимагає від АНС виконувати під час руху по траєкторії деякі динамічні характеристики.

На основі проведеного аналізу технік навігацій АНС виявлені актуальні проблеми. Важливими питаннями вважають проблеми в униканні перешкод, швидкість проходження маршруту, проблеми автономії. Проблеми в надійності функцій наведення, навігації та контролю для використання у різних умовах експлуатації та складних середовищах.

Важливою проблемою також варто вважати підвищення ефективності планування шляху. Ефективно побудований маршрут дасть змогу економити енергетичні ресурси для руху, змінить підхід до виконання місій та розширить можливості у роботі.

Планування шляху АНС. Техніка наведення є важливою складовою будь-якого автономного судна. Для роботи у більш складних умовах з динамічно змінним середовищем потрібні більш розширені можливості наведення.

Планування шляху є важливою складовою наведення АНС. Головна ціль планування шляху – знаходження можливого шляху у певному середовищі. Процес планування умовно можна розділити на три етапи: планування маршруту, планування траєкторії та планування руху. Траєкторія повинна бути оптимізована з урахуванням відстані, часу, споживанням енергії, вартістю ризику та іншими

аспектами. Крім того, не можна ігнорувати плавність траєкторії та те, чи відповідає вона кінетичним обмеженням АНС.

Одними із головних методів, які використовують під час планування шляху, є використання алгоритмів оптимізованого руху. Цей підхід активно застосовується у всій робототехніці. Для найкращої оптимізації шляху необхідно зібрати інформацію про перешкоди: розмір, точне положення, швидкість та напрям руху. Якість застосування методу напряму залежить від функціонування датчиків.

Оптимізація руху безпілотних апаратів вимагає розв'язання складної задачі, яка полягає в мінімізації функції від цільових параметрів руху (швидкості, прискорення, кутової швидкості тощо) при заданих обмеженнях. За середовищем функціонування алгоритми оптимізації умовно класифікують на статичне та динамічне. За цією характеристикою можна відокремити дві великі категорії – Глобальні та Локальні алгоритми планування.

Глобальні алгоритми оптимізації маршрутів спрямовані на пошук оптимального маршруту задля досягнення цільової мети. Вони працюють на основі моделі маршрутів та загальної інформації про навколишнє середовище. Серед основних методів цього класу слід виділити Алгоритм штучних потенційних полів [12], Метод дорожньої карти [13], Алгоритм Дейкстри [14].

Одним із прикладів алгоритмів розглянуто алгоритм Дейкстри. Його ідея стала основою для утворення багатьох похідних алгоритмів, які базуються на клітковому розбитті. Працює через знаходження максимального значення (див. рис. 1), вага кожної сторони графа, та відстань повинні мати позитивні значення [15].

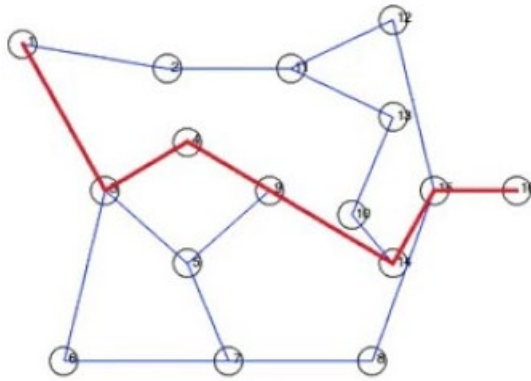


Рис. 1. Маршрут, побудований за допомогою графів

Іншим прикладом алгоритмів є алгоритм Rapidly-exploring Random trees (RRTs) – це імовірнісний алгоритм, який використовується для швидкого дослідження просторів та планування шляхів [16]. RRTs ефективно працює для задач з великою розмірністю, нелінійними, динамічними або диференціальними обмеженнями. Його сутність у створенні дерева (див. рис. 2), яке вирощується шляхом з'єднання випадкових вибірок у вільному просторі.

Локальні алгоритми планування працюють у середовищі, яке частіше невідоме та динамічне, і тому процес побудови маршруту відбувається саме під час руху. Його головна особливість полягає у тому, що маршрут генерується шляхом

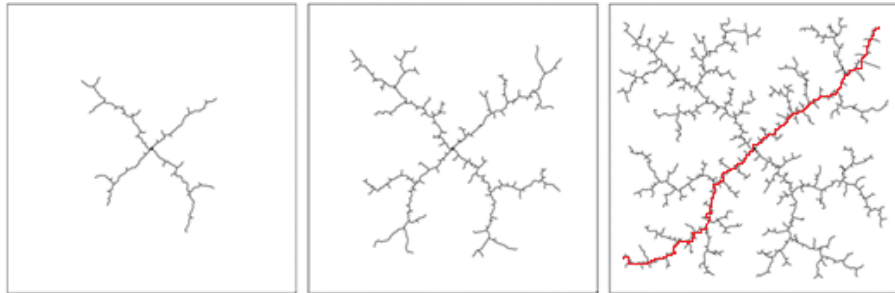


Рис. 2. Маршрут, побудований із дерева

отримання інформації від різноманітних датчиків у момент руху робота. Локальні методи планування шляху використовуються, коли мобільний робот перебуває у незнайомому середовищі, яка може містити кінцеве число обмежених перешкод, і у результаті робот має рухатись на цільову позицію. Цей підхід є технічно більш складним, але має широке застосування. До цієї групи алгоритмів відносяться: алгоритм локального потенційного поля [17], Метод гістограми векторного поля (VFH) [18], алгоритми сімейства Bug [19].

Метод потенційних полів (PFM) також є відомим представником локальних алгоритмів. У цьому методі об'єкт руху розглядається у ролі частинки, яка рухається під дією штучного потенціалу, створеного конфігурацією цілі та перешкодами (див. рис. 3).



Рис. 3. Маршрут, побудований із потенційних полів

Гібридне планування шляху з'явилося як результат спроб підвищити ефективність руху між змінними точками у небезпечному середовищі та поєднання підходів глобального та локального планування шляху. Цей підхід можна вважати рішенням для створення АНС, який буде працювати як в статичних, так і в динамічних середовищах [20]. З цього з'явилась ідея поєднання різних алгоритмів між собою. Наразі активно досліджуються алгоритми на основі нейронних мереж та машинному навчанні.

Ефективність застосування методів оптимізації руху АНС вимагає врахування великої кількості параметрів, які впливають на процес самої оптимізації. Зокрема, до таких параметрів можна віднести швидкість руху АНС, зону покриття, область руху та інші фактори, що пов'язані з характеристиками конкретного АНС.

На думку автора, одним із потенційних шляхів підвищення ефективності планування шляху є сформування чітких критерій оптимізації, які повинні виконуватись. Важливо зазначити, що ці параметри повинні виходити із цільового призначення АНС та самого алгоритму. Як результат проведеного дослідження сформовано такі критерії:

- довжина шляху – критерій важливості руху за найкоротшим шляхом;
- відстань до перешкоди під час руху – критерій, який впливає на безпечний рух робота на відстані від перешкод;
- рівномірність шляху – важливо щоб під час руху за маршрутом не було різких змін у траєкторії;
- фокус на стартовій точці – критерій необхідності знаходитись у зоні видимості початкової або фінішної точки. Цей критерій можна використовувати для побудови маршруту з урахуванням підтримки зв'язку з пунктом управління;
- масштабованість – критерій можливості працювати на різних територіях;
- пріоритетність – критерій виконання під час руху певних задач або досягнення певної точки. Залежить від цілей, які стоять перед АНС.

Дослідження та подальше вдосконалення алгоритмів оптимізації під час планування шляху для автономних надводних суден має великий потенціал для покращення ефективності руху, точності та безпеки їх функціонування. Алгоритми оптимізації дозволяють забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Використання критеріїв оптимізації для роботи алгоритму може значно підвищити ефективність планування шляху.

Висновки. Дослідження та розробка Автономних надводних суден продовжується і надалі. Зацікавленість у подібних суднах зумовлена широкими можливостями, які дозволяють застосувати їх у різних дослідницьких місцях. Автономний рух – важлива особливість, яка розширює функціонал та робить АНС серйозним інструментом для роботи у різних умовах. Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що ефективний рух АНС під час виконання завдань – це комплексний процес, в основі якого лежить злагоджена робота навігаційної системи, правильно спланований маршрут та врахування зовнішніх факторів впливу.

У статті проведено огляд методів навігації та особливостей руху АНС, основних структурних елементів та систематизовано основні проблеми та виклики, які наразі існують. Також проведений аналіз процесу планування шляху АНС як важливого етапу, який лежить в основі руху АНС за заданим маршрутом. Досліджено важливий аспект планування шляху, а саме алгоритми оптимізованого руху як шлях підвищення ефективності руху. На основі дослідження було сформовано критерії оптимальності, урахування яких у роботі алгоритму дасть змогу покращити будівництво шляху та покращить загальну ефективність під час переміщення АНС. Розвиток алгоритмів оптимізованого руху дозволяє забезпечити гнучкість та адаптивність до змінних умов, що здатні забезпечити найкращі рішення в реальному часі. Подальше дослідження та впровадження алгоритмів оптимізації руху АНС відкриває нові перспективи для створення повністю автономних засобів нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mahley J., Development of the autonomous surface craft “ACES”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, C. 827. doi: 10.1109/ OCEANS. 1997.624102.
2. Roberts, G.N. & Sutton, Rhondasutton. (2006). Advances in Unmanned Marine Vehicles. 10.1049/PBCE069E.
3. Rasal, Ketan, Navigation & control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping. 2013. Santa Clara University. Mechanical Engineering.
4. Bertram, V. (2008). Unmanned surface vehicles—A survey. In Proceedings of Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark.
5. Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., & Pratt, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma. *Journal of Field Robotics*, 25(3), 164–180.
6. Peng, Y., J.D. Han and QJ Huang. Adaptive UKF Based Tracking Control for Unmanned Trimaran Vehicles. 2008.
7. Naeem, W., Xu, T., Sutton, R., & Tiano, A. (2008b). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 222(2), 67–79.
8. Larson, J., Bruch, M., & Ebken, J. (2006). Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. In Defense and Security Symposium (pp. 623007–623007). International Society for Optics and Photonics.
9. Wolf, M. T., Assad, C., Kuwata, Y., Howard, A., Aghazarian, H., Zhu, D., Huntsberger, T. (2010). 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27(6), 819–833.
10. Gal, Oren & Zeitouni, Eran. (2013). Tracking Objects Using PHD Filter for USV Autonomous Capabilities. 10.1007/978-3-642-33084-1_1.
11. Marco Bibuli, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia, Lionel Lapierre. Path-Following Algorithms and Experiments for an Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26, pp. 669–688. ff10.1002/rob.20303ff. fffhal-00733789f.
12. Ma’arif, Alfian & Wahyunggoro, Oyas & Imam, Adha. 2019. Artificial Potential Field Algorithm Implementation for Quadrotor Path Planning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 10.10.14569/IJACSA.2019.0100876.
13. Dale, Lucia, Amato, Nancy. 2001. Probabilistic roadmaps – Putting it all together. Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2. 1940–1947 vol. 2.
14. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. 1959. *Numer. Math.* 1, 269–271.

15. M. Noto and H. Sato. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm. *Smc 2000 conference proceedings.*, Nashville, TN, USA, 2000, pp. 2316-2320 vol.3, doi: 10.1109/ICSMC.2000.886462.
16. S. M. LaValle, *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*, Technical Report. 98-11.
17. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. 1986. O. Khatib. *Autonomous robot vehicles*. Springer, 396–404.
18. Borenstein, Johann, Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Trans. Robotics Autom.* 7 278-288.
19. K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls, A comparative study of bug algorithms for robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 121, 2019, 103261, ISSN 0921-8890.
20. G. Casalino, A. Turetta and E. Simetti. A three-layered architecture for real time path planning and obstacle avoidance for surveillance USVs operating in harbour fields. *OCEANS 2009-EUROPE*, Bremen, Germany, 2009, pp. 1–8, doi: 10.1109/OCEANSE.2009.5278104.

REFERENCES

1. Mahley J., Development of the autonomous surface craft “ACES”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering Sea Grant College Program Cambridge, C. 827. doi:10.1109/ OCEANS. 1997.624102.
2. Roberts, G.N. & Sutton, Rhondasutton. (2006). *Advances in Unmanned Marine Vehicles*. 10.1049/PBCE069E.
3. Rasal, Ketan, *Navigation & control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping*. 2013. Santa Clara University. Mechanical Engineering
4. Bertram, V. (2008). *Unmanned surface vehicles—A survey*. In *Proceedings of Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark
5. Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., & Pratt, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma. *Journal of Field Robotics*, 25(3), 164-180
6. Peng, Y., J.D. Han and QJ Huang. *Adaptive UKF Based Tracking Control for Unmanned Trimaran Vehicles*. 2008.
7. Naeem,W., Xu, T., Sutton, R., & Tiano, A. (2008b). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 222(2), 67–79.
8. Larson, J., Bruch, M., & Ebken, J. (2006). Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. In *Defense and Security Symposium* (pp. 623007–623007). International Society for Optics and Photonics
9. Wolf, M. T., Assad, C., Kuwata, Y., Howard, A., Aghazarian, H., Zhu, D., Huntsberger, T. (2010). 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27(6), 819–833.

10. Gal, Oren & Zeitouni, Eran. (2013). Tracking Objects Using PHD Filter for USV Autonomous Capabilities. 10.1007/978-3-642-33084-1_1.
11. Marco Bibuli, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia, Lionel Lapierre. Path-Following Algorithms and Experiments for an Unmanned Surface Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26, pp. 669–688. [ff10.1002/rob.20303](https://doi.org/10.1002/rob.20303)[ff.fhal-00733789f](https://doi.org/10.1002/rob.20303)
12. Ma'arif, Alfian & Wahyunggoro, Oyas & Imam, Adha. 2019. Artificial Potential Field Algorithm Implementation for Quadrotor Path Planning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 10.10.14569/IJACSA.2019.0100876.
13. Dale, Lucia, Amato, Nancy. 2001. Probabilistic roadmaps – Putting it all together. *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2. 1940–1947. vol. 2.
14. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. 1959. *Numer. Math.* 1, 269–271.
15. M. Noto and H. Sato, "A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm," *Smc 2000 conference proceedings.*, Nashville, TN, USA, 2000, pp. 2316–2320. vol. 3, doi: 10.1109/ICSMC.2000.886462.
16. S. M. LaValle, *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*, Technical Report. 98-11.
17. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. 1986. O. Khatib. *Autonomous robot vehicles*. Springer, c. 396–404.
18. Borenstein, Johann, Koren. 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Trans. Robotics Autom.* 7 278–288.
19. K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls, A comparative study of bug algorithms for robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 121, 2019, 103261, ISSN 0921-8890.
20. G. Casalino, A. Turetta and E. Simetti, "A three-layered architecture for real time path planning and obstacle avoidance for surveillance USVs operating in harbour fields," *OCEANS 2009-EUROPE*, Bremen, Germany, 2009, pp. 1–8, doi: 10.1109/OCEANSE.2009.5278104.