Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Высшая школа автоматизации и робототехники

**ОТЧЁТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Обзор подходов к построению автопилотов малых безэкипажных судов**

Выполнил

студент гр. 3331506/60401 <*подпись*> Д.Д. Сидоренко

Руководитель

старший преподаватель <*подпись*> А.С. Габриель

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

**Реферат**

На 22 с., 10 рисунков

В данной работе рассматриваются подходы к проектированию программных комплексов для малых безэкипажных судов. Затрагиваются вопросы, связанные с ветровой и волновой нагрузками, учётом течения и дрейфа судна. Рассматриваются методы построения траекторий, с учетом большой площади зоны работы малых безэкипажных судов. А также рассматриваются методы предотвращения столкновений с динамическими объектами, в том числе с учетом морских правил расхождения судов.

Содержание

[Введение 5](#_Toc61989712)

[1 Математическая модель движения судна. 6](#_Toc61989713)

[2 Планирование траекторий 9](#_Toc61989714)

[2.2 Эволюционные методы 11](#_Toc61989715)

[3 Следование по траектории 13](#_Toc61989716)

[3.1 Расхождение судов 15](#_Toc61989717)

[4 Методы управления рулем и удержания судна на курсе 16](#_Toc61989718)

[5 Тестирование алгоритмов автопилотирования малых безэкипажных судов 18](#_Toc61989719)

[Вывод 19](#_Toc61989720)

[Список литературы 20](#_Toc61989721)

**Перечень сокращений и условных обозначений**

В настоящем отчете по НИР применяются следующие обозначения и сокращения.

USV – Unmanned Surface Vessel (Безэкипажный надводный аппарат)

IMU - Inertial measurement unit (инерциальный измерительный модуль)

ПИД – пропорциональный интегральный регулятор

PSO – Оптимизация роя частиц

GA – градиентный спуск

Введение

Первые работы в области безэкипажных судов проводились Николой Тесла в конце 18 века[1]. Сегодня малые безэкипажные суда используются в военно-морских, научных и коммерческих целях. Согласно USV (Unmanned Surface Vessel) Master Plan [2] безэкипажные малые суда военно-морского применения используются для следующих задач: противолодочная оборона, морская безопасность, поиск мин[3], организация связи и навигации, радиоэлектронная борьба. Научные безэкипажные суда используются для экологического мониторинга, контроля и исследования климата и океанографии[4,5]. Коммерческие [6] USV применяются для контроля расхода воды в водоемах на основе метода измерения поперечных скоростей течения.

Для решения коммерческий, научных и военно-морских задач в надводной морской робототехнике используются технологии автопилотирования. В стек таких технологий входят методы картографирования, локализации, предотвращения столкновений, построения маршрутов, удержания курса судна, следование по маршруту. В отличи от наземных роботов безэкипажные суда склонны к дрейфу по поверхности воды. Дрейф возникает под силами ветра, подводных течений и волновой нагрузки.

Классически проблема автономного пилотирования роботов делится на две части. Первая часть связана с построением маршрута. Вторая часть связана с удержанием судна на построенном ранее маршруте или удержание курса (только для летательных и плавательных судов).

Целью данной работы является описание и сравнение методов и технологий, применяемых для навигации и автономного пилотирования малых безэкипажных судов.

Математическая модель движения судна.

Для понимания проблематики построения автопилота для малых безэкипажных судов, необходимо привести математическое описание модели движения судна по поверхности воды. Для систем автопилотирования используют разные модели математического описания. Отличие между моделями заключается в количестве учитываемых параметров при формировании модели. Минимально в математическую модель должны входить три степени свободы, тяга двигателя, Угол поворота руля, масса и моменты инерции судна[7]. Так же необходимо учитывать внешние силы ветра и течений. Так же необходимо учитывать гидро статические и динамические силы, возжигаемые при движении судна[8]. Зачастую малые суда обладают большой парусностью при малом весе, что приводит к значительному вкладу влияния сил ветра и течений на характер движения судна[9]. Учет ветрового смещения и смещения от течений позволяет повысить качество алгоритма автопилота.

Вышеописанные параметры движения судна проиллюстрированы на рисунке 1[10].

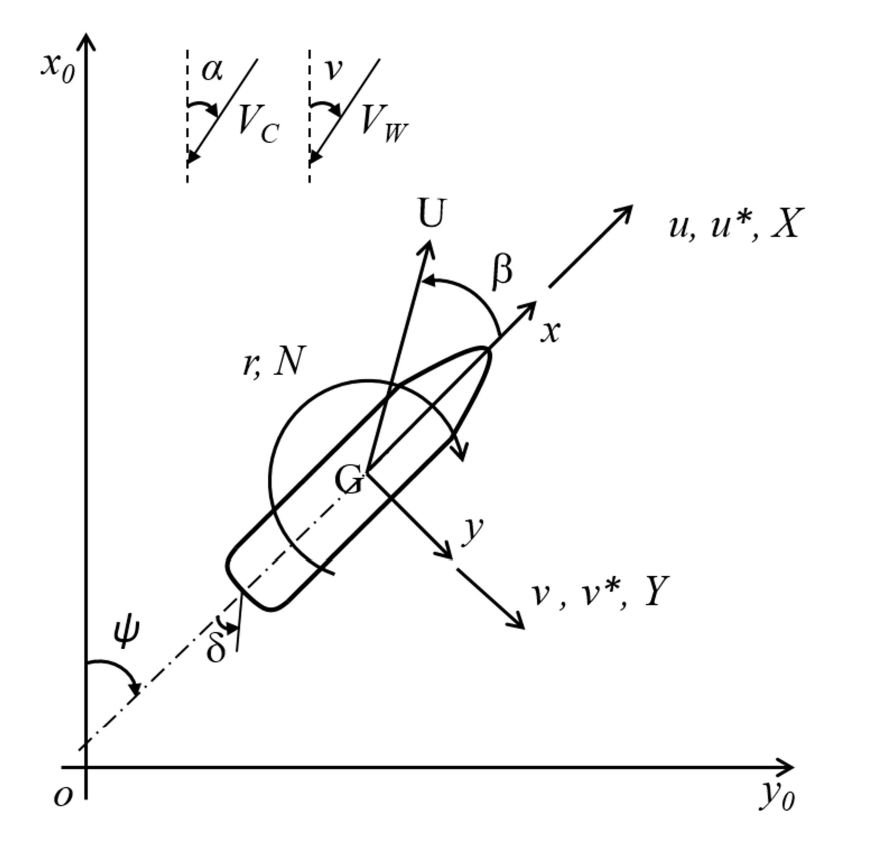


Рисунок - Параметры движения судна

На рисунке 1 обозначены две системы координат: система , жестко связанная с поверхностью планеты, и система , связанная с судном. Центром системы является центр масс судна. Система координат связана с глобальной системой координат Земли и для применения алгоритмов движения по плоскости применяются алгоритмы перевода сферических координат[11]. Угол отражает текущее значение угла курса судна. Вклад ветра отражает угол , значение отражает скорость ветра. Вклад течения отражает угол , значение отражает скорость течения. Отклонение руля обозначено углом . Значения обозначают скорость судна, угол сноса и скорость рыскания соответственно. Из описанных выше параметров можно составить системы уравнений (1) и (2)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Для описания учета гидро- и аэродинамический воздействий от корпуса судна, винта, руля и ветра применяется метод суперпозиции и система уравнений (3).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

В системе уравнений 3 индексами jобозначены компоненты воздействий корпуса (hull), винта (propeller), руля (rudder) и ветра (wind) соответственно. Так как влияние на компоненты перемещения по оси и вращения судна малы, то ими можно пренебречь[12].

При проектировании автопилотов с учетом волнового воздействия вышеописанные системы уравнений (1,2) расширяются добавлением 3х степеней свободы, отсутствующими ранее моментами инерций и волновым воздействием, включая характер, направление и силу волнового воздействия[8]. Так как малые базэкипажные суда не предназначены к эксплуатации в штормовых условиях и при больших океанских волнах, то волновой нагрузкой пренебрегают[13].

Описанная математическая модель судна позволяет строить алгоритмы управления рулем для достижения целевой координаты. Режим работы двигателя судна выбирается из расчета оптимальности по расходуемой энергии и радиуса миссии.

Планирование траекторий

При навигации в маринах и в закрытой воде с большим количеством неподвижных препятствий, таких как острова, буи, форваторы рек, необходимой программной компонентой является планирование траектории движения. Схема построения автопилота для малых судов представлена на рисунке 2.

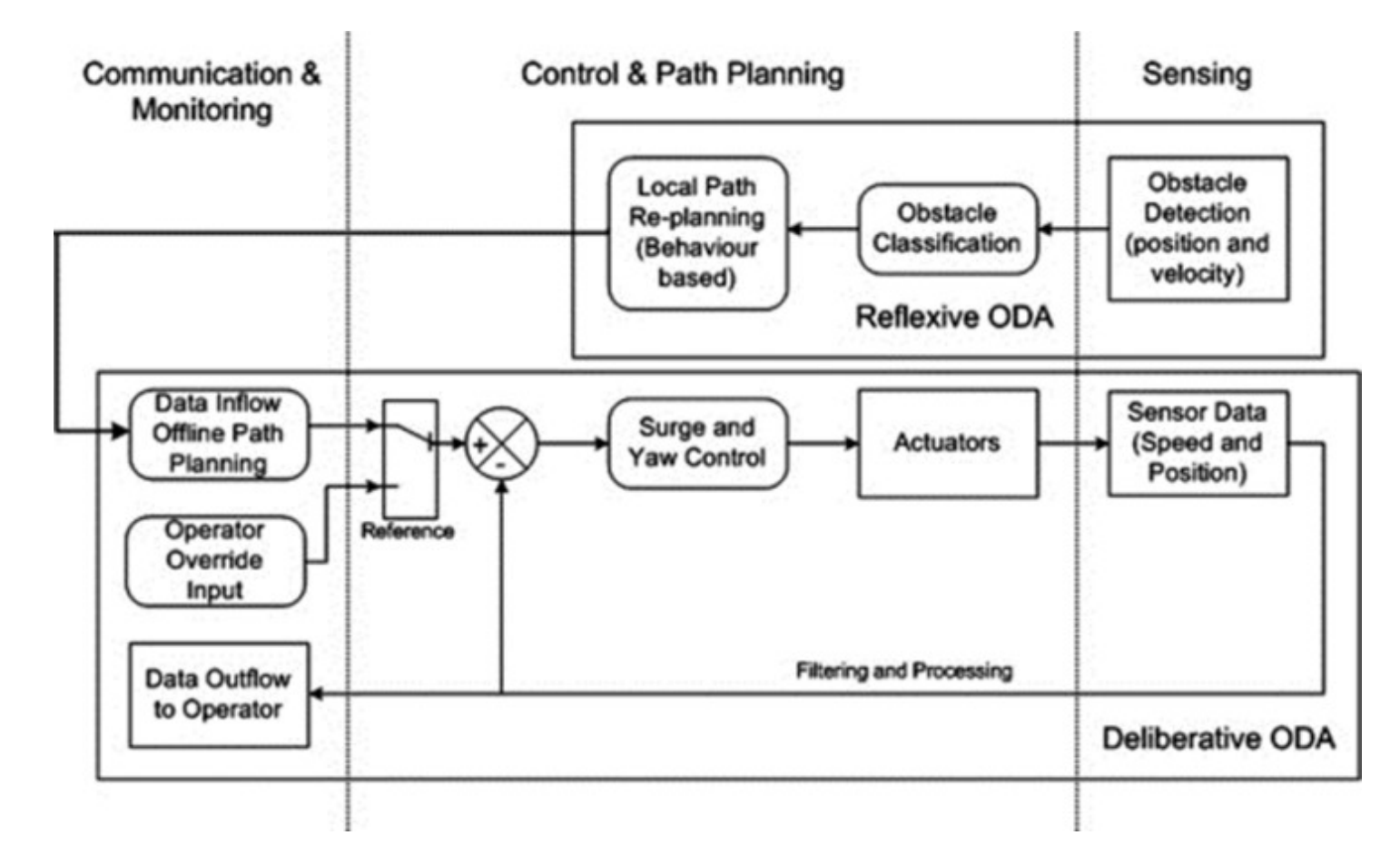


Рисунок 2 - Схема автопилота USV

Выделим два ключевых узла в данной схеме:

* локальный планировщик (Lockal Path Re-planing), используемый для предотвращения столкновений и корректирующий траекторию движения судна;
* глобальный планировщик, ответственный за построение траектории от начальной координаты судна до целевой координаты с учетом заранее известных препятсявий.

Рассмотрим подробнее методы построения траекторий для малых безэкипажных судом. Существует большое количество алгоритмов, применяемых для решения данной задачи. Схема алгоритмов подобного рода представлена на рисунке 3 [14].

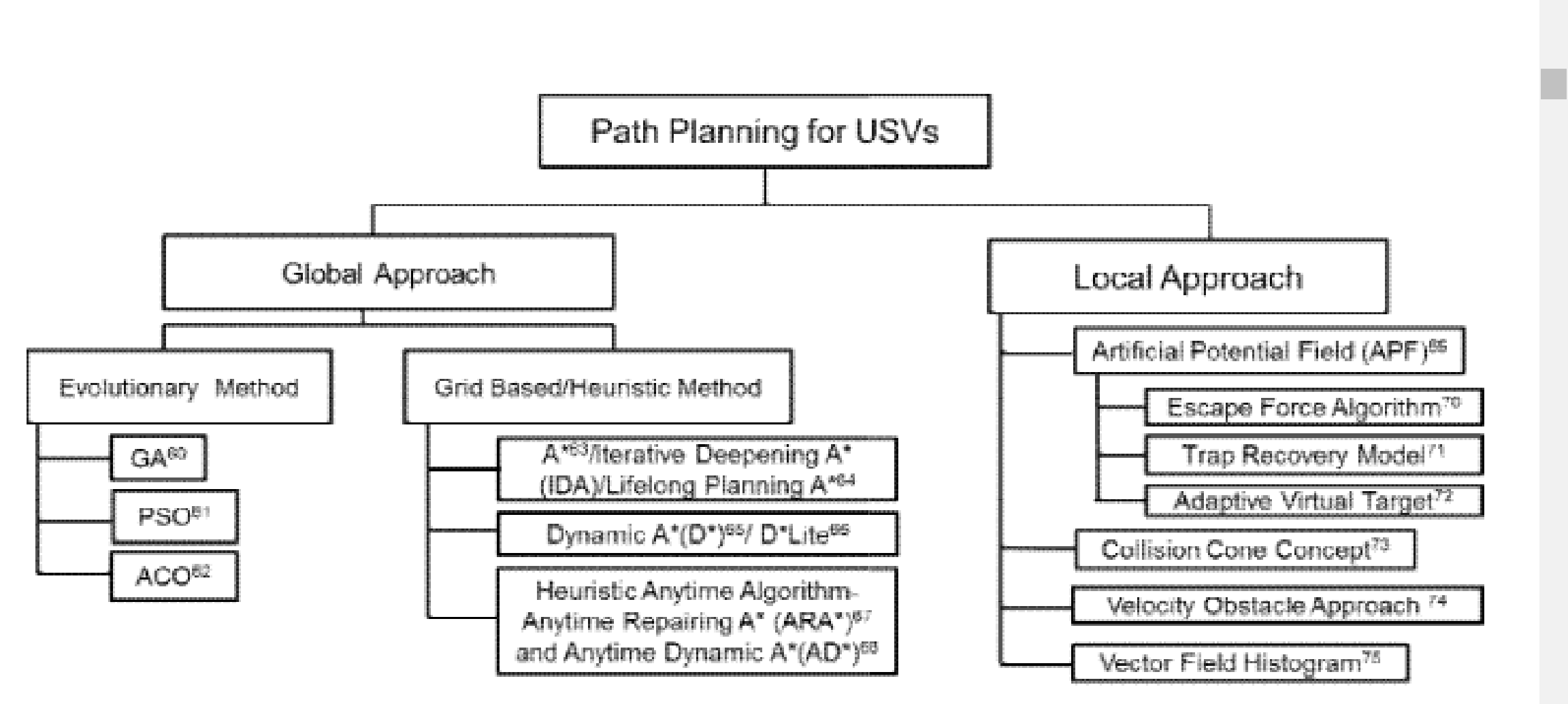


Рисунок - Методы планирования траекторий

Как видно из рисунка 123 методы планирования траекторий разделяются на две группы:

* Эволюционные (evolutionary);
* Основанные на сетке (grid base).

## Методы основанные на сетке

Классическим методом планирования траектории на сетке является метод A\* [15]. Применимость данного метода в всей группы методов ограничена. Так как для построения маршрута необходимо помнить весь маршрут от начальной точки до целевой. Так же перед началом движения методы данной группы вынуждены строить весь маршрут целиком, что не обязательно для эволюционных методов. Данная группа методов широко применяется для навигации наземных роботов в закрытых помещениях, так как площадь карты, а соответственно и длина маршрута у наземных роботов за частую меньше, чем у морских. Методы данной группы нашли широкое применение у малых безэкипажных судов, применяемых исключительно в маринах и портах. Обычно такие суда обладают большей маневренностью и оснащены лидаром [13].

Различные способы построения сетки для методов первой группы показаны на рисунке 4 [14].

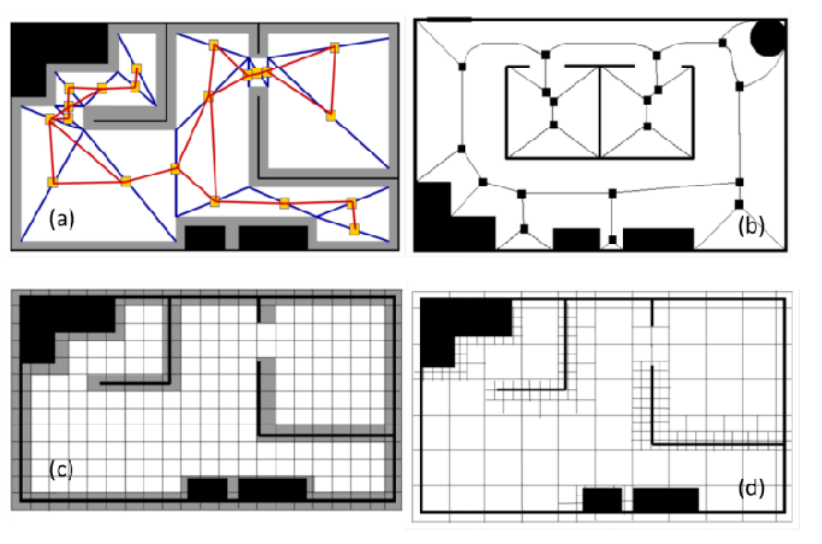


Рисунок 4 - Сравнение методов построения траекторий

На рисунке 3a показан метод луговой (meadows) карты, 3b диаграмма Вороня, 3c сетка с постоянным размером ячейки, 3d сетка квадкодерева (quadtree).

Применяя разреженные сетки и методы сглаживания траекгории на ломанной сетке можно значительно сократить количество хранимой информации[16].

Эволюционные методы

Применение эвалюционных методов позволяет сократит количество хранимых параметров. Так же на открытой воде методы, основанные на сетке, являются избыточными.

Эвалючионный алгоритм оптимизации роя частиц (PSO) не нашел большого распространения в автопилотировании, так как получаемая траектория близка а алгоритма A\* на сетке с постоянным размером и требуется большая вычислительная мощьность [17]. Вот вообще не факт. Статью я не читал, но почему-то его нигде нет

Использование алгоритмов, основанных на построении графов, таких как RRT[18] позволяют значительно сократить число хранимых точек на маршруте. Минусом данных алгоритмов является итеративность. Также из-за особенностей расстановки узлов, может сложиться ситуация, что по полученным узлам невозможно построить маршрут в заданную точку и необходимо проводить еще итерации по расстановке узлов графа. Пример построения графа методом RRT. Несмотря на то, что метод RRT строит дерево итеративно и относиться к эволюционным методам, непосредственно поиск маршрута по полученному дереву осуществляется методами поиска пути на сетке, такими как A\* и методом Дейкстры. Только в этом случае сетку заменяют на дерево.

Следование по траектории

Когда траектория между целевой и текущей позоциями полученна возникает задача следования по задпнной траектории. За следования по траектории отвечает локальный планировщик. На рисунке 5 [14] представленны методы, используемые в локальных планеровщиках для малых морских судов.

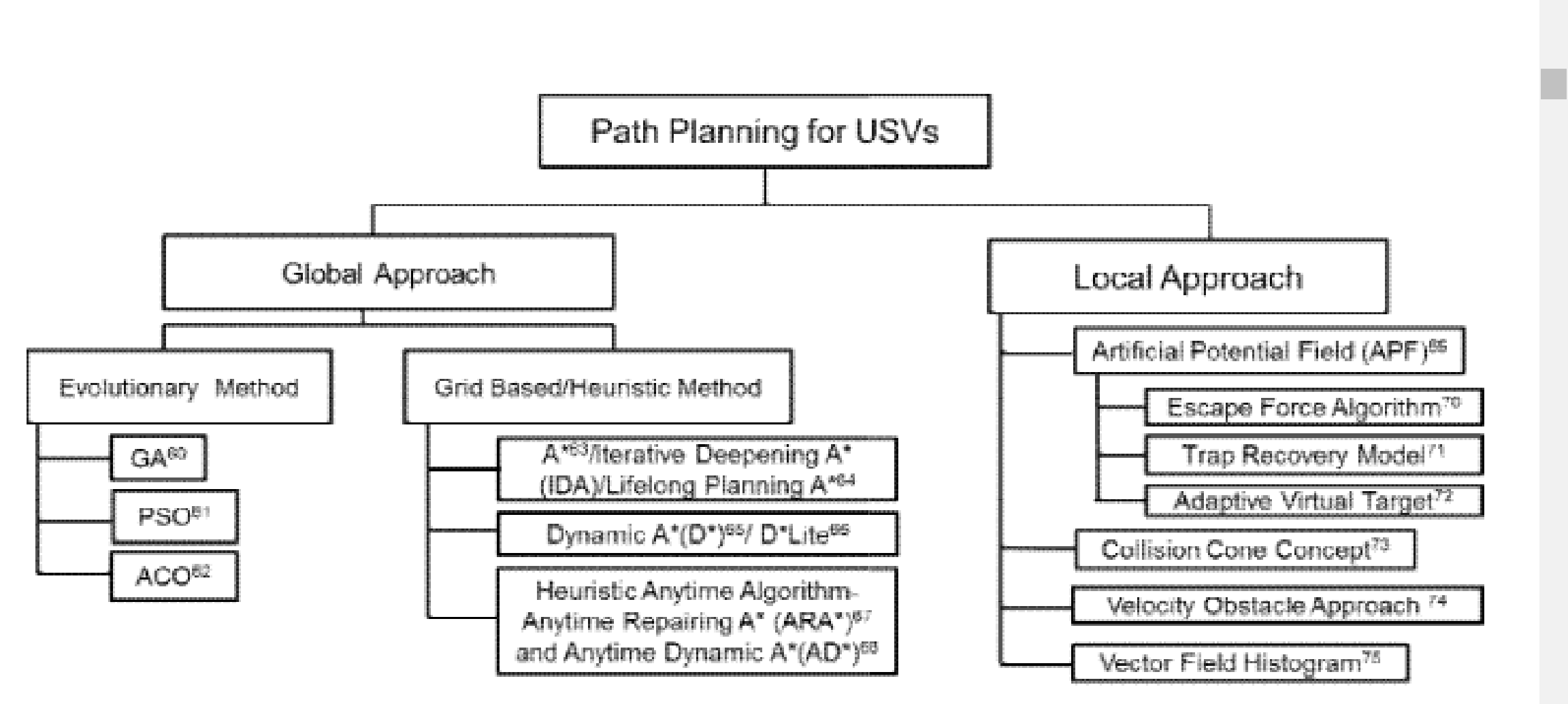


Рисунок - Виды локальных планировщиков

При проектировании систем автопилотирования для парусных судов наиболее распространение получил метод градиентного спуска [19–21](gradient ascent, GA). Так как применение данного метода позволяет комбинировать две потенциальные поверхности. Первая поверхность классически служит для учета препятствий. Вторая поверхность учитывает курсовые углы к ветру [21]. На рисунках 6 и 7 приведен пример использование градиентного спуска на потенциальных поверхностях для парусных судов [22].

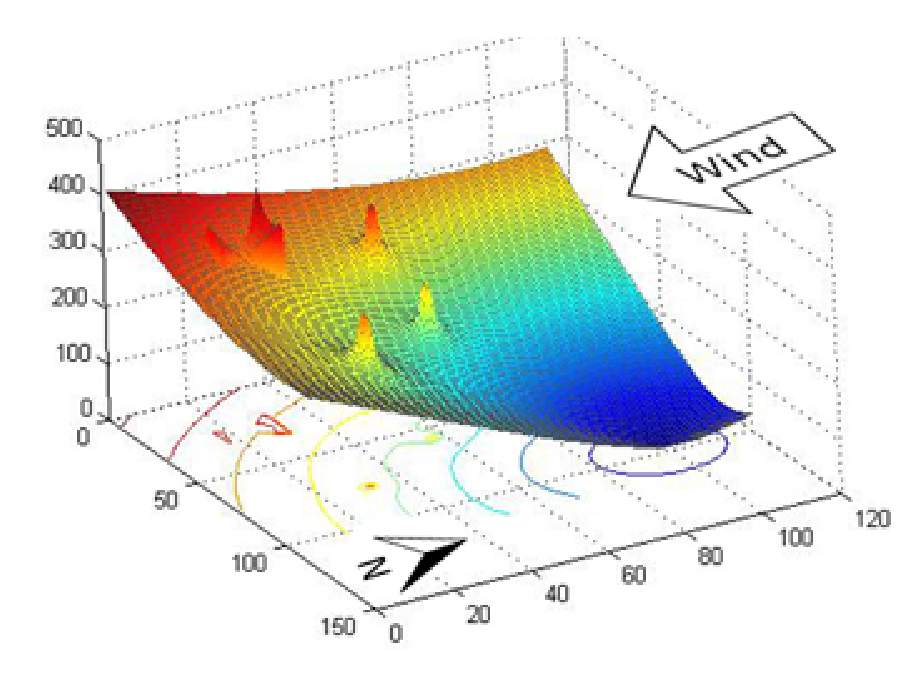


Рисунок - Потенциальная поверхность препятствий

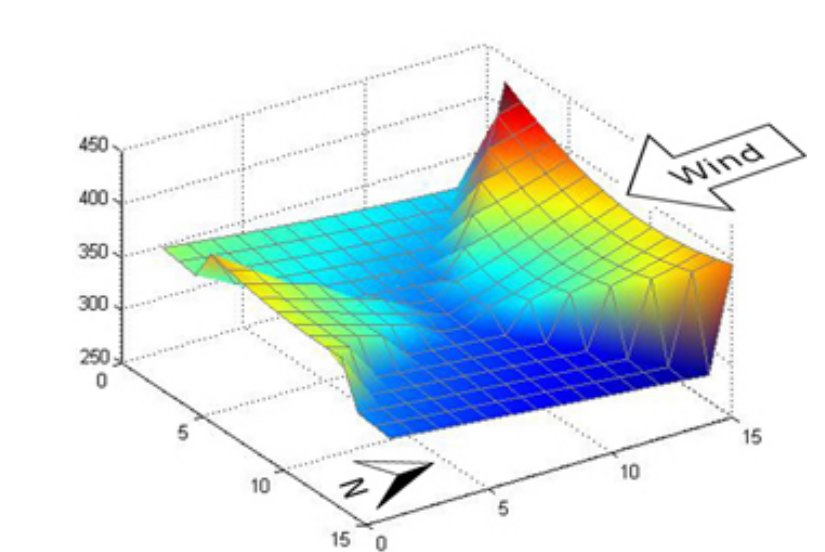


Рисунок - Потенциальная поверхность курсовых углов к ветру

Методы основанные на конусе столкновений [23] зачастую применяются как дополнительные для прогнозирования столкновений в динамической среде. Методы подобного рода без дополнительных доработок слабо применимы к морским судам, так как не учитывают морские правила расхождения судов.

Расхождение судов

Важным аспектом в судовой навигации является система курсового расхождения судов с учетом международных правил[7]. На рисунке 8a показан пример правильного и 8b неправильного расхождения судов

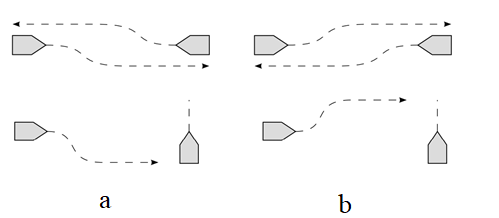


Рисунок - Пример расхождения судов

Данные о возможных столкновениях с судами система расхождения может получать от системы АИС и систем технического зрения[24].

Методы управления рулем и удержания судна на курсе

После построения траектории и избегания столкновений в локальной области необходимо применить полученные ранее данные о локальных целевых скорости, курсе и месте положения судна для непосредственного управления приводом руля судна. Для поставленной задачи применяются следующие методы:

* ПИД регулирование;
* нечеткая логика;
* нейронные сети.

На ранних этапах проектирование беспилотных систем для малых морских судов применялись методы ПИД регулирования. Как показала практика данный метод регулирования угла отклонения руля является не устойчивым при изменяющихся погодных условиях и в современных системах ПИД регулирование рулем не применяют [25,26].

Большее распространение получили методы, основанные на нечеткой логике [27]. На практике данные методы являются более устойчивы в малом при использовании систем с глобальным и локальным планировщиками, а так же на открытой воде и без статических и динамических препятствий могут применяться без планировщика траекторий[28]. Как видно из рисунка 9 область эффективной зоны регулятора на нечеткой логике больше, чем у ПИД регулятора[29].

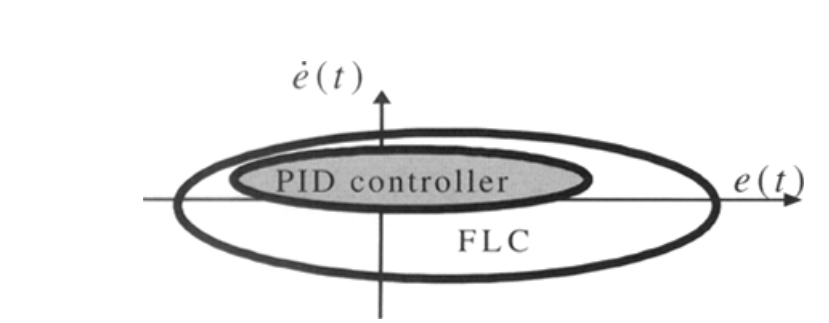


Рисунок - Область эффективной зоны регуляторов

Но, как и методы ПИД нечеткая логика плохо справляется с волновой нагрузкой. Дальнейшее развитее регуляторы получили в области нейронных сетей[30]. Подобные методы могут учитывать большое число параметров, в том числе и данные с IMU[24] датчиков, что позволяет очинивать характер волнения[31].

Тестирование автопилотов малых безэкипажных судов

Для оценки качества разработанных систем автопилотирования для малых безэкипажных судов применяют метод описывания окружностей судном. При тестировании алгоритмов необходимо обеспечить различные погодные условия. Пример прохода по окружности для оценки качества автопилота приведен на рисунке 10 [5].

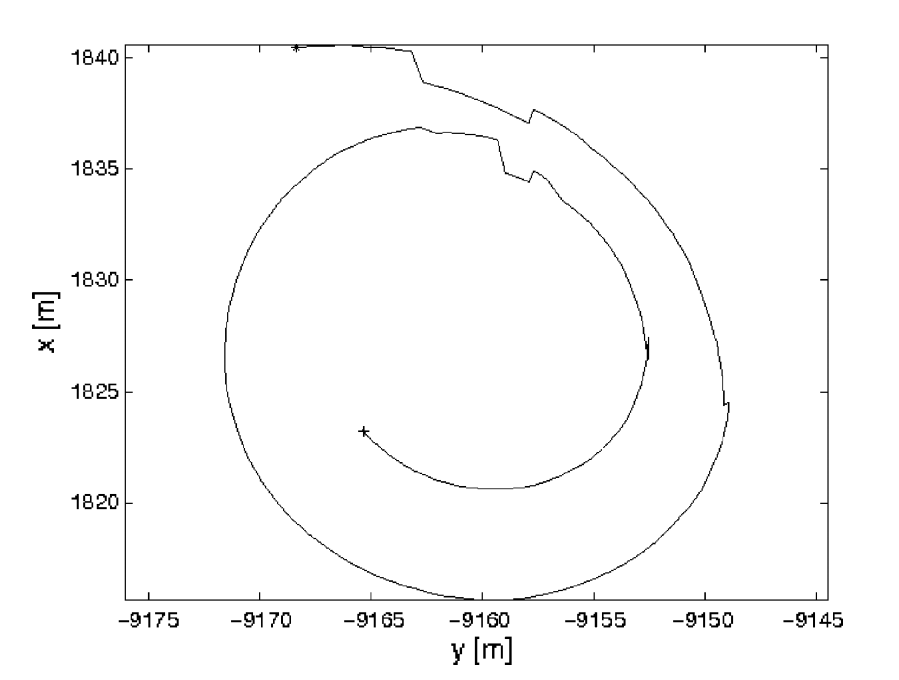


Рисунок - Пример тестирования автопилота

Вывод

Применение подходов в планирование траекторий на разряженной сетке или графе дает более плавные траектории, меньше расходует память бортового компьютера малого безэкипажного судна. Что положительно выделяет данные подходы к планированию траекторий над методами, основанными на сетке.

Для использования судна на открытой воде совместно с другими судами необходимо применять не только методы предотвращения столкновений с динамическими объектами, но и учитывать морские правила расхождения судов.

Так методы регулирования угла отклонения руля, основанные на ПИД регулировании, показывают хороший результат при отсутствии ветра и течений. Методы, основанные на нечеткой логике, лучше справляются с течение и ветром, в том числе и переменными. Для автопилотирования в условиях волновой нагрузки применяются нейронные сети.

Список литературы

1. Marincic A., Budimir D. Tesla’s multi-frequency wireless radio controlled vessel // IEEE Hist. Telecommun. Conf. HISTELCON 2008. 2008. № June. P. 24–27.

2. U.S. Navy. The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan. 2004. № July. P. 127.

3. DARPA’s Autonomous Sub-Tracker - Copybook [Electronic resource]. URL: https://web.archive.org/web/20160508193036/http://www.copybook.com/military/news/darpa-s-autonomous-sub-tracker (accessed: 17.01.2021).

4. Curtin T. et al. Autonomous Oceanographic Sampling Networks // Oceanography. 1993. Vol. 6, № 3. P. 86–94.

5. Caccia M., Bruzzone G., Bono R. A practical approach to modeling and identification of small autonomous surface craft // IEEE J. Ocean. Eng. 2008. Vol. 33, № 2. P. 133–145.

6. COLEMAN A.L., WANG B.P. Design of an Adaptive Autopilot for Commercial Marine Use // Navigation. 1980. Vol. 27, № 3. P. 207–216.

7. Stenersen T. Guidance System for Autonomous Surface Vehicles // 123. 2015. № June. P. 125.

8. Описание математической модели движения морского подвижного объекта в горизонтальной плоскости // «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». 2018.

9. Carlson D.F. et al. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring // HardwareX. The Authors, 2019. Vol. 5. P. e00059.

10. Choe B., Furukawa Y. Automatic track keeping to realize the realistic operation of a ship // Int. J. Fuzzy Log. Intell. Syst. 2019. Vol. 19, № 3. P. 172–182.

11. Soler B.T., Hothem L.D. Coordinate systems used in geodesy: basyc definations and concepts. 1988. № 2.

12. Kijima K. et al. On the manoeuvring performance of a ship with theparameter of loading condition // J. Soc. Nav. Archit. Japan. 1990. Vol. 1990, № 168. P. 141–148.

13. Ueland E.S. et al. Marine Autonomous Exploration using a Lidar MSC THESIS DESCRIPTION SHEET. 2016. № June.

14. Singh Y. et al. Optimal path planning of unmanned surface vehicles // Indian J. Geo-Marine Sci. 2018. Vol. 47, № 7. P. 1325–1334.

15. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern. 1968. Vol. 4, № 2. P. 100–107.

16. Jensen T.M. Waypoint-Following Guidance Based on Feasibility Algorithms. 2011. № June. P. 115.

17. Adamu P.I. et al. Shortest path planning algorithm – A Particle Swarm Optimization (PSO) approach // Lect. Notes Eng. Comput. Sci. 2018. Vol. 2235, № July.

18. Naderi K., Rajamaki J., Hamalainen P. RT-RRT∗: A real-time path planning algorithm based on RRT∗ // Proc. 8th ACM SIGGRAPH Conf. Motion Games, MIG 2015. 2015. № November. P. 113–118.

19. John H. Holland. Adaptation in Natural and Artificial Systems // An Introd. Anal. with Appl. to Biol. Control. Artif. Intell. 1992.

20. Ruzicka T. Model based Design of a Sailboat Autopilot. 2017. Vol. 1. P. 52.

21. Helmi Abrougui, Dallagi H., Nejim S. Autopilot Design for an Autonomous Sailboat Based on Sliding Mode Control // Autom. Control Comput. Sci. 2019. Vol. 53, № 5. P. 393–407.

22. Pêtrès C., Romero-Ramirez M.A., Plumet F. Reactive path planning for autonomous sailboat // IEEE 15th Int. Conf. Adv. Robot. New Boundaries Robot. ICAR 2011. 2011. № 1. P. 112–117.

23. Chakravarthy A., Ghose D. Obstacle avoidance in a dynamic environment: A collision cone approach // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part ASystems Humans. 1998. Vol. 28, № 5. P. 562–574.

24. Daniel H. The Autonomous Maritime Navigation (AMN) Project: Field Tests, Autonomous and Cooperative Behaviors, Data Fusion, Sensors, and Vehicles // J. F. Robot. 2010.

25. Lim C.C. et al. Autopilot for ship control ,. 1983. Vol. 130, № 6.

26. Zhang X.K., Zhang G.Q. Design of Ship Course-Keeping Autopilot using a Sine Function-Based Nonlinear Feedback Technique // J. Navig. 2016. Vol. 69, № 2. P. 246–256.

27. Omerdic E., Roberts G.N., Vukic Z. A fuzzy track-keeping autopilot for ship steering // J. Mar. Eng. Technol. 2003. Vol. 2, № 1. P. 23–35.

28. Yu F. Adaptive fuzzy design of ship’s autopilot with input saturation // Proc. - 2013 Int. Conf. Inf. Technol. Appl. ITA 2013. 2013. № 3. P. 312–317.

29. Le M.-D., Nguyen S.-H., Nguyen L.-A. Study on a new and effective fuzzy PID ship autopilot // Artif. Life Robot. 2004. Vol. 8, № 2. P. 197–201.

30. Junaid K.M. et al. A neural network based adaptive autopilot for marine applications // 2006 IEEE Conf. Cybern. Intell. Syst. 2006. P. 1–6.

31. Tung L.T. Design a ship autopilot using neural network // J. Sh. Prod. Des. 2017. Vol. 33, № 3. P. 192–196.