

В. А. Бобков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru,
В. П. Май, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: may@iacp.dvo.ru,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Визуальная навигация автономного подводного робота с учетом самопересечений траектории¹

Предложен метод визуальной навигации автономного подводного робота применительно к условиям локального маневрирования, ориентированный на повышение точности локализации робота за счет генерации виртуальной сети координатной привязки.

Ключевые слова: визуальная одометрия, автономный подводный робот, навигация, loop closure

Введение

Важной задачей при выполнении автономным подводным роботом (АПР) рабочей миссии в условиях априори неизвестной обстановки является задача его точной локализации, традиционно решаемая с помощью штатного навигационного оборудования. Более эффективному решению этой задачи способствует развитие подхода, основанного на визуальной одометрии. Такой подход особенно целесообразен в условиях локального маневрирования АПР, когда необходимы высокоточные перемещения АПР в ограниченной области. Однако известно, что для метода визуальной одометрии характерно накопление со временем ошибки вычисления траектории. Для уменьшения этой ошибки применяются различные методики: повторная инициализация расчета с привязкой к новой внешней системе координат (СК), метод выравнивания (bundle adjustment) [1] применительно ко всей траектории или локальное выравнивание [2], метод межкадровой привязки [3], интегрирование в вычислительную схему других сенсорных измерений [2] и др. В случае движения робота по самопересекающейся траектории возможно уточнение параметров траектории за счет использования преимуществ повторного посещения аппаратом/роботом одних и тех же мест (loop closure). В известных работах в этом направлении, например в работах [4–6], акцент делается на задаче опознавания мест. При этом одним из наиболее востребованных является

так называемый "метод корзины слов" (bag-of-words method) [7]. Примером другого подхода, основанного на использовании предварительно подготовленных 3D-карт обстановки, является работа [8].

В настоящей статье предлагается развитие ранее разработанного метода визуальной навигации АПР, направленное на повышение точности локализации за счет учета самопересечений траектории при продолжительном маневрировании АПР в ограниченной области. Отличительной особенностью метода является построение на начальном этапе движения АПР виртуальной системы координатной привязки, состоящей из взаимосвязанных опорных систем координат.

Базовый метод визуальной навигации

Разработанный ранее базовый метод визуальной навигации [9, 2] (без учета самопересечений траектории) в соответствии с классической схемой реализации визуальной одометрии [10] содержит следующие шаги:

1. Выделение общего множества особенностей на четверке изображений двух стереопар. Сопоставление точечных особенностей выполняется на четырех изображениях — двух стереопарах (1-2 и 3-4), соответствующих двум последовательным позициям АПР на траектории. Для сопоставления особенностей используется детектор SURF (библиотека OpenCV) или трекер KLT. Для каждой пары изображений выполняется сопоставление слева направо и справа налево (cross-checking). Для исключения ложных сопоставлений применяется эпиполярный фильтр для пары 3-4 и для пары 1-2. Полученное в итоге множество особенностей,

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00165), Программы "Дальний Восток" (проект 18-5-014) и Программы Президиума РАН "Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров".

сопоставленных для всех четырех изображений, позволяет далее построить два сопоставленных облака 3D-точек, отвечающих двум стереопарам (двум позициям АПР).

2. Генерация и фильтрация двух облаков 3D-точек.

3. Вычисление с помощью алгоритма ICP (Iterative Closest Point) локального геометрического преобразования H , связывающего локальные системы координат (СК) двух соседних позиций. Поиск этого преобразования основывается на имеющемся взаимно однозначном сопоставлении двух облаков (множеств) 3D-точек, наблюдаемых стереокамерой, соответственно, в позициях 1 и 2. Первое облако $C^1(x, y, z)$ задано в СК первой стереопары, второе облако $C^2(x, y, z)$ — в СК второй стереопары. Задача нахождения матрицы H формулируется как оптимизационная задача и решается с применением процедуры из библиотеки общего пользования MATLAB. В качестве параметров оптимизации используются три координаты вектора переноса и четыре координаты кватерниона, определяющего вращение в H . Ограничение задается условием равенства единице нормы кватерниона. Целевая функция — $F = \sum \|c_k^2 - c_k^1 H\|_p$, суммирование ведется по индексу k , где k — номер точки в облаке. Здесь $\{c_k^1\}$ — множество точек в первом облаке и $\{c_k^2\}$ — множество точек во втором облаке. Тогда с учетом вычисленной матрицы H новое положение АПР вычисляется через предыдущее как $p_2 = p_1 H$.

4. Вычисление параметров 6DOF (Six Degrees of Freedom) текущей позиции АПР в мировой системе координат (МСК) путем объединения последовательности локальных преобразований предшествующих позиций.

Метод навигации

в условиях локального маневрирования

Предлагаемый метод визуальной навигации применительно к ситуации локального маневрирования АПР (когда движение осуществляется в ограниченной области подводной среды с возможными самопересечениями траектории) основывается на описанном выше и реализованном авторами базовом методе визуальной одометрии. Цель предлагаемого метода — воспрепятствовать накоплению ошибки навигации АПР при длительном локальном маневрировании за счет обработки ситуаций повторного посещения аппаратом одних и тех же мест и,

тем самым, повысить точность навигации в целом. Входной информацией служит видеопоток, фиксируемый при движении АПР стереокамерой (направленной вниз). В работе метода выделяются два этапа, которые соответствуют двум этапам движения АПР по траектории. На первом этапе формируется сеть опорных систем координат (ОСК), которая при последующем движении АПР, т. е. на втором этапе, используется для повышения точности вычисления траектории АПР за счет возможных привязок к ОСК. В качестве ОСК рассматриваются локальные системы координат АПР/камеры в конкретных позициях траектории. Все ОСК связаны с мировой системой координат (МСК) через цепочку матриц геометрических преобразований, которые: а) порождаются непосредственно при работе базового метода (число матриц равно числу шагов) или б) берутся из уже существующей ОСК в случае успешной к ней координатной привязки (тогда число матриц равно числу матриц в ОСК + 1). Параметры траектории вычисляются в МСК, которая фиксируется в начальный момент времени. Поскольку накопление ошибки напрямую зависит от длины цепочки преобразований, то степень "точности" конкретной ОСК можно характеризовать степенью ее "близости" к МСК, т. е. можно присвоить каждой ОСК коэффициент степени близости k , равный длине цепочки преобразований, ведущей к МСК (если связь напрямую, то $k = 1$). Чем короче цепочка преобразований, тем меньшую ошибку при вычислении 6DOF она порождает. Этот коэффициент можно использовать для оптимального выбора ОСК на этапе навигации АПР в случае, когда АПР "видит" более одной ОСК.

Формирование ОСК

1. В начальный момент фиксируется МСК и стартует базовый метод визуальной навигации, с помощью которого на каждом шаге (шаг равен заданному числу кадров) выполняется вычисление параметров (6DOF) позиции траектории. Продолжительность траектории на этапе формирования ОСК предварительно задается отметкой времени или длиной пройденного аппаратом пути. Для более высокой эффективности использования сети ОСК желательно форму траектории этого участка выбирать таким образом, чтобы траектория по возможности равномерно и плотно покрывала (в плоскости дна) область маневрирования

АПР. Понятие плотности в данном случае подразумевает, что значительная площадь рассматриваемой области покрывается общей зоной видимости всех ОСК (камер в соответствующих позициях траектории).

2. В позициях траектории, определяемых заданным интервалом (числом кадров), осуществляется фиксация очередной новой $ОСК_{new}$, которая заносится в список ОСК, образующих сеть координатной привязки. С каждой ОСК связывается порция информации, необходимая для работы алгоритмов. В нее входит: стереопара снимков, полученная в данной позиции, абсолютные координаты АПР в данной позиции, накопленная в результате работы базового метода последовательность локальных матриц геометрического преобразования, геометрия видимого камерой участка дна. Если ближайшая (к текущей позиции) из уже существующих $ОСК_{old}$ имеет общую зону видимости с текущей позицией, то выполняется редактирование информации, относящейся к $ОСК_{new}$. А именно, ее последовательность локальных матриц заменяется на соответствующую последовательность матриц (более короткую), принадлежащую $ОСК_{old}$. Такая операция повышает точность локализации $ОСК_{new}$. Формирование ОСК выполняется также и на втором этапе, но только при условии их привязки к уже существующим ОСК. Следует заметить также, что эффективность виртуальной сети координатной привязки зависит от геометрии траектории АПР, поскольку все ОСК находятся на траектории.

Привязка к ОСК

Стандартная схема вычисления параметров каждой позиции траектории АПР в МСК предполагает согласно базовому методу перемножение всей цепочки матриц локальных преобразований, полученных на предыдущих шагах, что, как известно, приводит к накоплению существенной ошибки в случае длинной цепочки преобразований. Использование системы высокоточных ОСК позволяет потенциально исключать длинные цепочки преобразований на отдельных шагах, тем самым повышая точность навигации в целом. Суть работы алгоритма на этом этапе заключается в привязке текущей позиции к ОСК, когда это возможно (рис. 1), с заменой накопленной цепочки локальных преобразований на более короткую, принадлежащую ОСК, с дополнительным преобразованием H , связывающим текущую позицию с ОСК. Рас-

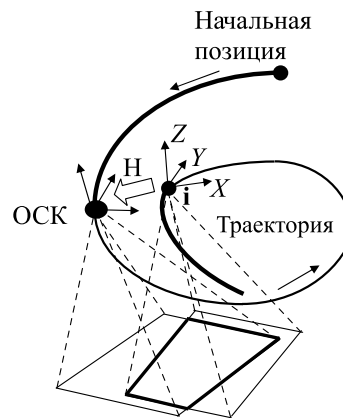


Рис. 1. Привязка АПР в текущей позиции i к ОСК: вычисление матрицы преобразования H ; замена длинной цепочки преобразований (от ОСК до позиции i (участок траектории обозначен тонкой линией) на короткую (от начальной позиции до ОСК (участок траектории обозначен жирной линией) + преобразование H)



Рис. 2. Работа алгоритма при вычислении позиции АПР на текущем шаге

чет перекрытия зон видимости, который лежит в основе проверки возможности привязки к ОСК, выполняется на основе известных данных о параметрах камеры и вычисленных параметрах траектории. Схема работы алгоритма представлена на рис. 2.

Режим мультисессии

В случаях, когда робот выполняет работу в одном и том же месте в разное время многократно, появляется возможность использовать для навигации виртуальную сеть координатной привязки, полученную в предыдущей

сессии. Это может дать дополнительное повышение точности навигации. Для этого необходимо обеспечить привязку новой траектории к прежней траектории. В нашем методе предполагается, что такую точную привязку можно осуществить базовым методом визуальной одометрии при условии, что начальная точка новой траектории будет находиться в близости к начальной точке прежней траектории. В данном случае понятие близости подразумевает, что зоны видимости двух камер должны перекрываться. Предварительные расчеты показали, что АПР, пользуясь штатными средствами навигации, может выйти в заданную точку с точностью, которая удовлетворяет указанному выше условию близости.

Таким образом, в повторных сеансах виртуальная сеть опорных систем координат становится гуще, что способствует дополнительно (по отношению к однопроходному режиму, когда виртуальная сеть привязки формируется и используется на протяжении одной траектории) повышению точности навигации АПР.

Обсуждение результатов

Эффективность рассмотренного метода в данной работе оценивали на модельных сценах. Помимо этого анализировали и аспекты практической реализации предлагаемых программно-алгоритмических средств, которые потенциально могут ограничивать применимость предложенной технологии, а именно:

1. *Достаточность вычислительных ресурсов АПР.* В некоторых современных автономных необитаемых подводных аппаратах (АНПА) в качестве вычислителей используются Atom 1 или 4 ядра, 1.6 ГГц, 1 ГБ ОЗУ. Внешняя память — твердотельные диски с объемом в среднем 500 Гбайт. На борту могут быть установлены 2...4 таких вычислителя, объединенных сетью Ethernet 100/1000. Для обработки изображений возможно использование Jetson Nvidia. Таких вычислительных ресурсов достаточно для работы предлагаемых программно-алгоритмических средств.

2. Негативно влияет на точность расчета траектории визуальным методом вертикальное маневрирование АНПА (быстрое изменение параметров 6DOF приводит к ухудшению сопоставления особенностей на изображениях и, как следствие, к ошибкам в расчете локальных матриц геометрического преобразования). Чтобы уменьшить такое влияние, можно счи-

тать, что координатная привязка осуществляется на малой скорости движения АНПА, т.е. в режиме зависания. Для реализации этого режима у АНПА имеются вертикальные и горизонтальные подруливающие устройства. Стабилизация осуществляется по 5 степеням свободы (курс, дифферент, продольные и поперечные перемещения). Перемещения в вертикальной плоскости фиксируются по датчику глубины (датчику давления) или высоты (эхолоту). Точность стабилизации 4...5 см.

Вместе с тем, обработку визуальной информации можно интегрировать с измерениями штатной бортовой навигационной системы, что позволяет повысить точность навигации визуального метода [2].

3. Поскольку для надежной привязки к пунктам виртуальной сети координатной привязки требуется достаточное число особенностей на обрабатываемых изображениях, желательно планировать траекторию так, чтобы она проходила над участками, где это условие выполняется. Это возможно, поскольку навигационная система АНПА позволяет осуществлять поисковые движения с точностью в несколько метров.

4. Безусловно, на эффективность применения метода визуальной навигации влияет прозрачность воды. Возможные пути снижения влияния этого фактора: уменьшение высоты движения АНПА до 1...1,5 м; метод визуальной навигации "включается" только при наличии порогового числа сопоставляемых особенностей на изображениях, в противном случае работает штатная навигационная система АНПА.

Тестирование разработанных прототипных программно-алгоритмических средств метода проводили на модельных сценах, получаемых с помощью моделирующего комплекса [11]. На рис. 3 в качестве примера показана одна из

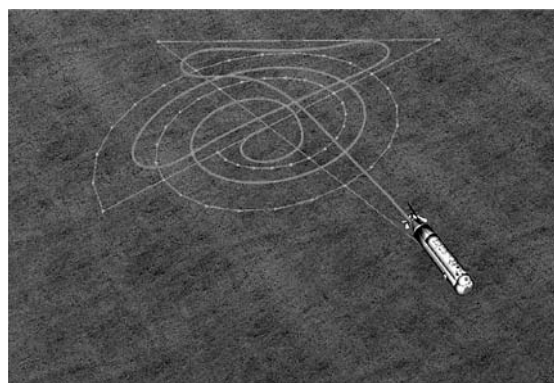


Рис. 3. Сцена для тестирования метода: траектория длиной 3180 кадров; частота съемки = 10 кадров/с; высота траектории над дном 0,6...3,3 м; шаг между расчетными позициями на траектории — 8 кадров

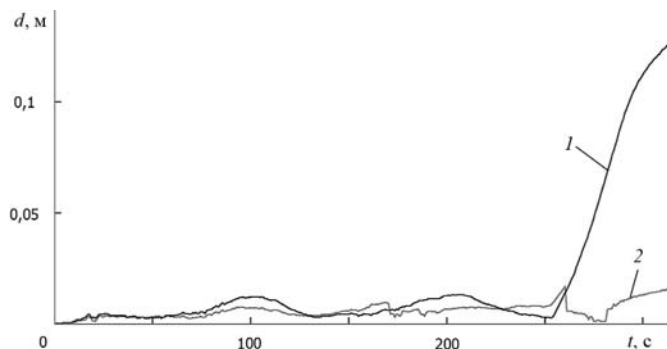


Рис. 4. Абсолютная ошибка расчета траектории АПР:
 а — базовым визуальным методом (1); б — визуальным методом с использованием виртуальной сети координатной привязки (2). По оси x — время движения по траектории

виртуальных сцен. Результаты представлены на рис. 4. Как видно из графика, регулярная привязка к виртуальной сети ОСК предотвращает накопление погрешности при расчете траектории АПР. В процессе движения АПР на первом участке траектории было сгенерировано 33 ОСК, а при движении на втором участке было 37 обращений к ОСК. За счет привязки к ОСК накопление ошибки локализации АПР свелось к минимуму — 1,6 см вместо 13 см при обычной работе визуального метода.

В дальнейшем планируется развитие подхода как в части совершенствования алгоритмической базы, так и в части тестирования метода на реальных данных.

Заключение

Тестирование на модельных сценах предложенного метода визуальной навигации АПР с использованием виртуальной сети координатной привязки показало принципиальную возможность применения предложенной схемы

вычисления параметров траектории АПР при длительных перемещениях робота в условиях локального маневрирования. В ближайшей перспективе планируется развитие метода в контексте решения задачи инспекции объектов подводной промышленной инфраструктуры.

Список литературы

1. Triggs B., McLauchlan P., Hartley R., Fitzgibbon A. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis // ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms. Springer-Verlag. 1999. P. 298—372.
2. Bobkov V. A., Ron'shin Y. I., Kudryashov A. P., Mashentsev V. Y. 3D SLAM from Stereoinages // Programming and Computer Software. 2014. Vol. 40, N. 4. P. 159—165.
3. Бобков В. А., Борисов Ю. С. Навигация подводного аппарата на малых дистанциях по оптической информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 75—78.
4. Olson E. Recognizing places using spectrally clustered local matches // Robotics and Autonomous Systems. 2009. Vol. 57, N. 12. P. 1157—1172.
5. Cummins M., Newman P. FAB-MAP: Probabilistic Localization and Mapping in the Space of Appearance // The International Journal of Robotics Research. 2008. Vol. 27, N. 6. P. 647—665.
6. Cadena C., Gálvez-López D., Tardós J., Neira J. Robust place recognition with stereo sequences // IEEE Transaction on Robotics. 2012. Vol. 28, N. 4. P. 871—885.
7. Sivic J., Zisserman A. Video google: A text retrieval approach to object matching in videos // In Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 2003. Vol. 2. P. 1470—1477.
8. Pinto M., Moreira A. P., Matos A., Sobreira H., Santos F. Fast 3D Map Matching Localisation Algorithm // International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2013).
9. Бобков В. А., Роньшин Ю. И., Машенцев В. Ю., Кудряшов А. П. Навигация автономного подводного аппарата по видеопотоку // Информационные технологии. 2013. № 3. С. 36—41.
10. Бобков В. А., Май В. П. О повышении эффективности решения 3D SLAM задачи по стереоизображениям // Информатика и системы управления. 2018. № 2. С. 14—23.
11. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC, October 19—22, 2015.

V. A. Bobkov, Dr. Tech. Sc., Chief Scientific Researcher, e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru,
 V. P. May, Cand. Tech. Sc., Leading Scientific Researcher, e-mail: may@iacp.dvo.ru,
 The Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Visual Navigation of Autonomous Underwater Robot with Loop Closing

The method of visual navigation of an autonomous underwater robot (AUV) for conditions of local maneuvering is described in article. The method aims to increase the accuracy of robot localization through generation and the using of virtual network for coordinate binding. The algorithms that implement the proposed method are based on the use of visual odometry and the proposed algorithms for re-visited places. The virtual coordinate binding network consists of the binding points generated at

the initial stage of the AUV movement. A binding point refers to a piece of data associated with a particular AUV position. This piece of data includes the position coordinates, a stereo pair of images visible by the camera from a given position, and a sequence of local geometrical transformation matrices accumulated by a given moment in time. It is assumed that the binding points have a high accuracy of coordinates since the method of visual navigation does not accumulate a large error with short movements of the AUV. At the stage of using the virtual network for coordinate binding a search and binding to the nearest binding point are performed. Improving the accuracy of AUV navigation is achieved by replacing a long sequence of local transformations associated with the current position with a shorter sequence associated with the binding point. Estimates of the effectiveness of the method on virtual scenes are obtained.

Keywords: visual odometry, autonomous underwater vehicle, navigation, loop closing, virtual coordinate referencing network

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-07-00165), "Priority scientific research studies for comprehensive development of the Far-Eastern Division of the Russian Academy of Science" Program (project No. 18-5-014) and the Programs of the RAS Presidium "Fundamental problems of tackling complex practical tasks using supercomputers" (project "Supercomputer modeling of dangerous oceanic and other natural phenomena and control of technogenic objects").

DOI: 10.17587/it.26...

References

1. Triggs B., McLauchlan P., Hartley R., Fitzgibbon A. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis, ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms, Springer-Verlag, 1999, pp. 298—372.
2. Bobkov V. A., Ron'shin Y. I., Kudryashov A. P., Mashentsev V. Y. 3D SLAM from Stereoimages, *Programming and Computer Software*, 2014, vol. 40, no. 4, pp. 159—165.
3. Bobkov V. A., Borisov Ju. S. Underwater vehicle navigation on small distances from optical data, *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2010, no. 2, pp. 75—78 (in Russian).
4. Olson E. Recognizing places using spectrally clustered local matches, *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, vol. 57, no. 12, pp. 1157—1172.
5. Cummins M., Newman P. FAB-MAP: Probabilistic Localization and Mapping in the Space of Appearance, *The International Journal of Robotics Research*, 2008, vol. 27, no. 6, pp. 647—665.
6. Cadena C., Gálvez-López D., Tardós J., Neira J. Robust place recognition with stereo sequences, *IEEE Transaction on Robotics*, 2012, vol. 28, no. 4, pp. 871—885.
7. Sivic J., Zisserman A. Video google: A text retrieval approach to object matching in videos, *In Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2003, vol. 2, pp. 1470—1477.
8. Pinto M., Moreira A. P., Matos A., Sobreira H., Santos F. Fast 3D Map Matching Localization Algorithm, *International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2013)*, Brussels, Belgium, 12—13 January, 2013.
9. Bobkov V. A., Ron'shin Yu. I., Mashentsev V. Yu., Kudryashov A. P. Navigation of an autonomous underwater vehicle by video stream, *Informacionnue Technologii*, 2013, no. 3, pp. 36—41 (in Russian).
10. Bobkov V. A., May V. P. On enhancement the solution efficiency of the 3D SLAM problem on stereo images, *Informatika i Sistemu Upravlenia*, 2018, no. 2, pp. 14—23 (in Russian).
11. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior, *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC*, October 19—22, 2015.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 10.08.2020. Подписано в печать 25.09.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT1020. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru