

## Визуальная навигация автономного подводного робота в условиях локального маневрирования\*

В.А. Бобков, А.П. Кудряшов, С.В. Мельман

bobkov@iacp.dvo.ru | kudryashov@iacp.dvo.ru | melman@iacp.dvo.ru

Владивосток, Россия, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

*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.

## Visual navigation for autonomous underwater vehicle under the conditions of local maneuvering \*

V.A. Bobkov, A.P. Kudryashov, S.V. Melman

Institute of Automation and Control Processes far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russian Federation

*Method of visual navigation of autonomous underwater robot for conditions of the local maneuver is offered. The method is aimed at improving the accuracy of the robot localization through the creation of a virtual network coordinate referencing.*

**Keywords:** visual odometry, autonomous underwater vehicle, navigation, 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 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 аппарата/роботом одних и тех же мест (loop closure). В известных работах в этом направлении, например, в [4,5, 6] акцент делается на задаче опознавания мест. При этом одним из наиболее востребованных является т.н. «метод корзины слов» (bag-of-

words method) [7]. Примером другого подхода, основанного на использовании предварительно подготовленных 3D карт обстановки, является [8].

В настоящей статье предлагается развитие ранее разработанного авторами 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 авторами ранее базовый метод визуальной навигации [9,2] (без учета самопересечений траектории), следуя классической схеме реализации визуальной одометрии, содержит следующие шаги:

1. Выделение общего множества особенностей на 4-ке изображений двух стереопар. Сопоставление точечных особенностей выполняется на 4-х изображениях – 2-х 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, сопоставленных для

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-00341, № 16-07-00350). Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-20482.

всех 4-х 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 ИСР алгоритма локального геометрического преобразования  $H$ , связывающего локальные 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 1-ой стереопары, 2-е облако  $C^2(x, y, z)$  – в СК 2-й стереопары. Задача нахождения матрицы  $H$  формулируется как оптимизационная задача и решается применением процедуры библиотеки общего пользования MATLAB. В качестве параметров оптимизации используются 3 координаты вектора переноса и 4 координаты кватерниона, определяющего вращение в  $H$ . Ограничение задается условием – норма кватерниона равна 1. Целевая функция  $F = \sum \|c_k^1 - c_k^2 * H\|$ ,  $k$  – 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) текущей позиции АПР в мировой СК 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 = числу шагов); или б) берутся из уже существующей ОСК в случае успешной к ней координатной привязки (тогда число матриц = 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, 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.

### Этап формирования ОСК

1. В момент  $t_0$  фиксируется МСК и стартует базовый метод визуальной навигации, с помощью которого на каждом шаге (шаг = заданному числу кадров) выполняется вычисление параметров 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<sub>new</sub>, которая заносится в список ОСК, образующих сеть координатной привязки. С каждой ОСК связывается порция информации, необходимая для работы алгоритмов, как на этапе 1, так и на этапе 2. 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<sub>old</sub> 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  $ОСК_{old}$ .

## Второй этап

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 исключить 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  $ОСК +$  преобразование, связывающее текущую позицию с  $ОСК$ . Расчет 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.

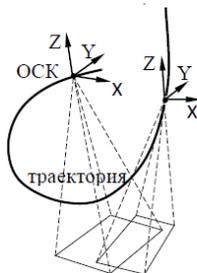


Рис. 1: Привязка текущей позиции

## Результаты экспериментов

Тестирование метода проводилось на модельных сценах, одна из которых показана на рис.3. Результаты представлены на рис.4.

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.

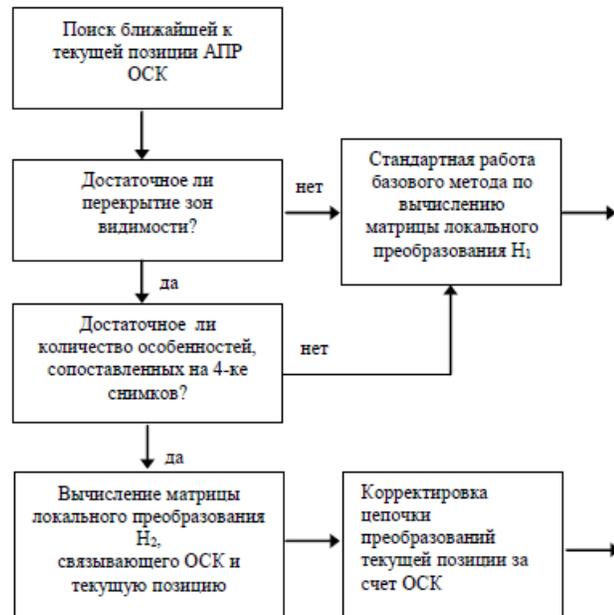


Рис. 2: Работа алгоритма при вычислении позиции АПР на текущем шаге

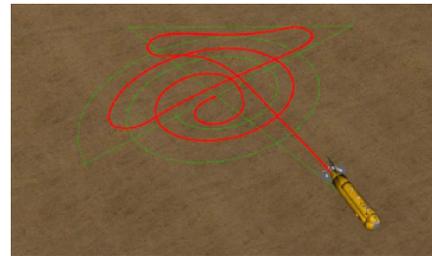


Рис. 3: Сцена для тестирования метода: траектория длиной 3180 кадров; частота съемки = 10 кадров/сек; высота траектории над дном 0.6–3.3 м; шаг между расчетными позициями на траектории = 8 кадров

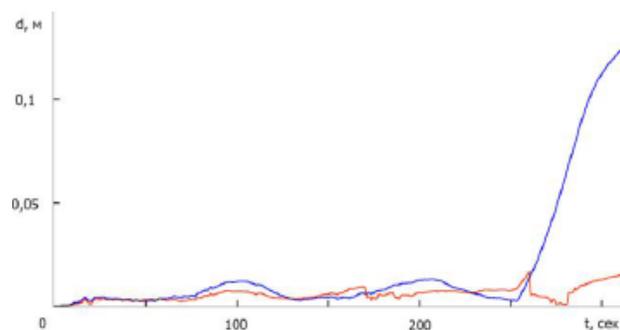


Рис. 4: Абсолютная ошибка расчета траектории АПР: а) базовым визуальным методом (синий); б) визуальным методом с использованием виртуальной сети координатной привязки (красный). По оси  $x$  – время движения по траектории

## Заключение

Тестирование на модельных сценах предложенного метода визуальной навигации АПР с использованием виртуальной сети координатной привязки показало эффективность предложенной схемы вычисления параметров траектории АПР при длительных перемещениях.

## Литература

- [1] B. Triggs; P. McLauchlan; R. Hartley; A. Fitzgibbon (1999). "Bundle Adjustment — A Modern Synthesis". ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms. Springer-Verlag. pp. 298–372.
- [2] V. A. Bobkov, Yu. I. Ron'shin, A. P. Kudryashov, and V. Yu. Mashentsev. 3D SLAM from Stereoimages // Programming and Computer Software, 2014, Vol. 40, No. 4, 2014, pp. 159–165.
- [3] В.А. Бобков, Ю.С. Борисов. Навигация подводного аппарата на малых дистанциях по оптической информации // Мехатроника, автоматизация, управление, №2, 2010, с. 75 – 78.
- [4] E. Olson, "Recognizing places using spectrally clustered local matches," Robotics and Autonomous Systems, vol. 57, no. 12, pp. 1157–1172, December 2009.
- [5] B. Williams, M. Cummins, J. Neira, P. Newman, I. Reid, J Tardós. A comparison of loop closing techniques in monocular SLAM Robotics and Autonomous Systems 57 (12), 1188-1197.
- [6] Cadena, C., Galvez, D., Ramos, F., Tardos, J., and Neira, J. Robust place recognition with stereo cameras. In Proc. IEEE / RJS Int. Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan, 2010.
- [7] Sivic, J. and Zisserman, A. (2003). Video google: A text retrieval approach to object matching in videos. In Proceedings of the International Conference on Computer Vision, volume 2, 1470-1477.
- [8] M. Pinto, A.P. Moreira, A. Matos, H. Sobreira, F. Santos. Fast 3D Map Matching Localisation Algorithm. International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2013).
- [9] В. А. Бобков, Ю. И. Роньшин, В. Ю. Машенцев, А. П. Кудряшов. Навигация автономного подводного аппарата по видеопотоку // Информационные технологии, №3, 2013, с. 36–41.