## О НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМАХ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Бобков<sup>1</sup>, С.В. Мельман<sup>1</sup>, А.Ю. Толстоногов<sup>2</sup>, А.Ф. Щербатюк<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>2</sup>

Описан метод визуальной навигации автономного необитаемого подводного аппарата по стереоизображениям с реализацией адаптивной методики расчета траектории и 6-облачного алгоритма вычисления локальных перемещений с использованием данных от бортовых навигационно-пилотажных датчиков. Метод основывается на реализации подхода, известного как визуальная одометрия. Предлагаемая адаптивная методика оптимизирует размер шага при расчете траектории движения с учетом данных о геометрии сцены, предварительно задаваемой степени перекрытия соседних видов камеры и скорости движения аппарата. Как следствие время расчета траектории существенно снижается без ущерба достигаемой точности навигации. 6-облачный алгоритм вычисления локальных перемещений расширяет классическую схему формирования 3D облаков за счет обработки данных от трех соседних позиций. Алгоритм включения в расчетную схему визуального метода дополнительной информации, получаемой бортовой навигационной системой (измерение углов ориентации оппарата), позволил снизить величину накапливаемой ошибки локализации. Приведены оценки эффективности предлагаемых модификаций алгоритма, полученные по результатам вычислительных экспериментов с виртуальными сценами и на реальных данных. Для подготовки виртуальных сцен и измерения ошибок метода использовался ранее разработанный авторами программный имитационный моделирующий комплекс, предназначенный для исследования методов управления АНПА и моделирования его рабочих миссий.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Визуальный метод локализации автономных роботов интенсивно развивается в последнее время применительно ко всем видам роботов. Он является также хорошим дополнением к штатным средствам навигации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), особенно в условиях локального маневрирования.

Высокоточное определение параметров движения АНПА является важной задачей при реализации режима позиционирования и в процессе выполнения им целенаправленных поисковых движений при наличии внешних возмущений (течение, морское волнение и т.д.). Режим позиционирования предназначен для поддержания определенных местоположения и ориентации АНПА. Данный режим необходим при выполнении операций, связанных с осмотром подводных сооружений, стыковкой и сбором данных вблизи дна [1–4]. Визуальная одометрия с использованием стереозрения [2, 5], обеспечивая высокую точность вычисления локальных перемещений, потенциально может сохранять приемлемую точность локализации робота и при его непродолжительном движении.

Однако, как известно, при длительном движении робота происходит накопление ошибки навигации. Совершенствование этого подхода, направленное на повышение точности, связано с разными аспектами, включая повышение достоверности сопоставления особенностей на снимках, повышение эффективности алгоритмов ICP (Iterative Closest Point) и др. [6–9]. Одним из способов повышения точности навигации АНПА является учет данных от бортовых навигационно-пилотажных датчиков в алгоритмах обработки изображений. Например, в работах [10–12] были предложены схемы интегрированной обработки визуальных данных и данных измерений инерциального сенсора.

Работа, описываемая в настоящей статье, также направлена на

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690041, Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: (423) 231-37-76. E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru <sup>2</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.:

<sup>(423) 243-26-47.</sup> E-mail: scherba@marine.febras.ru

повышение эффективности метода визуальной одометрии. В статье предлагается алгоритмическая база реализации визуального подхода с целью оптимизировать вычислительные затраты и повысить точность навигации АНПА, в том числе за счет интеграции измерений бортовых навигационно-пилотажных датчиков в процедуры обработки изображений.

#### Адаптивный метод визуальной навигации АНПА

Традиционная вычислительная схема метода визуальной одометрии с обработкой стереопоследовательности снимков организована следующим образом:

 Выделение общего множества особенностей на четверке изображений двух стереопар.

2. Генерация и фильтрация двух облаков 3D точек.

3. Вычисление локального геометрического преобразования, связывающего локальные СК двух соседних позиций.

 Вычисление параметров текущей позиции АНПА путем объединения локальных преобразований предшествующих позиций.

Согласно схеме на первом этапе анализируются две стереопары изображений, относящиеся к двум последовательным во времени позициям АНПА. Применительно к ним осуществляются поиск и сопоставление единого множества точечных особенностей, одновременно наблюдаемых на всех 4 изображениях. Для каждой из двух стереопар выполняется построение 3D точек-особенностей (3D облако) методом триангуляции, т.к. известна полная калибровка используемых камер. На втором этапе вычисляется геометрическое преобразование Н., связывающее локальные СК двух соседних позиций АНПА. Для этого применяется метод решения

оптимизационной задачи, где в качестве целевой функции рассматривается минимизация суммарных расхождений по всем точкам двух 3D облаков. Полученное преобразование определяет перемещение (6DOF) робота из предыдущей позиции в текущую позицию  $\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_{i-1} \cdot \mathbf{H}_i$ . Если в качестве мировой СК выбрана СК начальной позиции, то мировые координаты *i*-й точки траектории ПА вычисляются как

### $\mathbf{p}_{i} = \mathbf{p}_{0} \cdot \mathbf{H} \mathbf{w}_{i}^{-1},$

где  $\mathbf{H}\mathbf{w}_{i} = \mathbf{H}_{0} \cdot \mathbf{H}_{1} \cdot ... \cdot \mathbf{H}_{i}$ . Более подробное описание метода можно найти в [13–15].

Таким образом, в каждой позиции АНПА, где выполняется съемка, визуальный метод позволяет определить параметры траектории, а также 3D координаты точечных особенностей на поверхностях наблюдаемых объектов.

Описанная выше базовая вычислительная схема была модифицирована за счет реализации адаптивной методики расчета траектории АНПА, направленной на повышение эффективности метода.

Адаптивная методика. При реализации визуального метода обычно используется схема расчета траектории с фиксированным шагом выбора обсчитываемых позиций АНПА. Однако она не оптимальна, поскольку не учитывает характера движения АНПА в условиях конкретной сцены. В частности, не гарантируется достаточное количество сопоставленных особенностей, не учитываются форма траектории и динамика движения АНПА, число накапливаемых в буфере памяти кадров съемки при реальном движении аппарата не будет соответствовать фиксированному шагу. Как следствие это препятствует обеспечению режима реального времени в случае вычислительной трудоемкости используемых алгоритмов. Предлагаемая адаптивная

методика учитывает геометрию сцены и требования по реализуемой алгоритмической эффективности (высота траектории над морским дном, скорость движения АНПА, степень перекрытия соседних видов камеры). Согласно методу визуальной одометрии вычисление текущей позиции АНПА основывается на результатах обработки всех предшествующих позиций. Поэтому для соответствия режиму реального времени необходимо, чтобы скорость алгоритмических вычислений была достаточной для того, чтобы время компьютерной обработки поступающих визуальных данных не превышало времени движения АНПА по траектории на текущий момент. Адаптивность реализуется тремя совместно работающими механизмами: а) выбор размера очередного шага в зависимости от степени перекрытия зон видимости стереокамеры для двух соседних позиций; б) уменьшение шага, если число сопоставленных особенностей меньше заланного порога; и в) отсечение тех частей изображения, которые не относятся к перекрытию зон видимости, оно выполняется непосредственно перед генерацией и сопоставлением особенностей в каждом из 4 исходных изображений.

Первый механизм позволяет задавать максимальный размер очередного шага, гарантирующий заданную величину общей (для двух позиций) зоны видимости, что направлено на минимизацию числа обсчитываемых позиций и соответственно на уменьшение времени счета. Уменьшение или увеличение размера общей области видимости позволяет увеличивать или соответственно уменьшать максимальный шаг. Зависимость между величиной перемещения камеры и величиной общей зоны видимости определяется геометрией, показанной на рис. 1.



Рис. 1. Вычисление адаптивного шага

Второй механизм (уменьшения шага) направлен на поддержание числа особенностей на уровне не ниже заданного порога, что необходимо для обеспечения высокой точности вычисления матрицы локального преобразования (определяет перемещение АНПА из предыдущей в текущую позицию). Если количество сопоставленных особенностей меньше заданного порога, то делается повторное сопоставление после леления шага пополам (в экспериментах порог варьировался от 30 до 100 точечных особенностей). Процесс итеративный, пока не выполнится условие или размер шага не достигнет 1 кадра. Этот же алгоритм обеспечивает и последующее постепенное восстановление размера шага до максимального расчетного путем его удвоения.

Механизм отсечения части изображения, не относящейся к общей зоне видимости, дает два преимущества. Первое – сокращение времени обработки на этапе сопоставления особенностей за счет меньших размеров обрабатываемых изображений. Второе – эта процедура служит также и фильтром, поскольку естественным образом исключает возможные ошибочные сопоставления особенностей на неперекрывающихся областях, что, в конечном счете, приводит к повышению точности вычислений локальных преобразований. Последующие эксперименты подтвердили это предположение.

#### 6-облачная схема

После адаптивного вычисления очередной позиции роз<sub>і</sub> работает 6-облачный алгоритм. Его суть состоит в повышении точности локализации АНПА за счет минимизации расхождений между двумя потенциально эквивалентными вариантами вычисления локального перемещения при анализе трех последовательных позиций: pos<sub>i-1</sub>, роз<sub>і</sub> и средней между ними позиции роз<sub>middle</sub> (рис. 2).

Будем вычислять матрицы  $H_{i-1, middle}, H_{middle, i}, H_{i-1, i}$ , связывающие локальные СК соответствующих позиций. При вычислении каждой из указанных матриц геометрического преобразования осуществляется обработка 3D облаков стандартным способом. Будем исходить из того, что  $H_{i-1, \text{ middle}} \cdot H_{\text{middle}, i} = H_{i-1, i}$ . Тогда можно сформулировать на множестве точек 6 облаков оптимизационную задачу, в которой будут варьироваться параметры матриц  $H_{i-1, \text{ middle}}$  и  $H_{\text{middle, i}}$ . Матрица  $H_{i-1, i}$ вычисляется по формуле  $H_{i-1, i}$  =  $H_{i-1, middle} \cdot H_{middle, i}$ . Целевой функцией в этом случае будет:

$$F = \sum \| \mathbf{c}_{i}^{i-1, \text{ middle}} - \mathbf{c}_{i}^{\text{middle}, i-1} \cdot \mathbf{H}_{i-1, \text{ middle}} \| + \sum \| \mathbf{c}_{i}^{\text{middle}, i} - \mathbf{c}_{i}^{i, \text{middle}} \cdot \mathbf{H}_{\text{middle}, i} \| + \sum \| \mathbf{c}_{i}^{i-1, i} - \mathbf{c}_{i}^{i, i-1} \cdot \mathbf{H}_{i-1, i} \|,$$

где { $\mathbf{c}_{i}^{i-1, \text{ middle}}$ } – множество точек в первом облаке, а { $\mathbf{c}_{i}^{\text{middle, i-1}}$ } – множество точек во втором облаке для пары стереопар в позициях роз<sub>i-1</sub> и роз<sub>middle</sub>; аналогичным образом определены множества точек для других облаков. Здесь возможны два способа выбора очеред-



Puc. 2. Вычисление локального перемещения по 6 облакам

ного шага. Согласно первому способу вычисление параметров траектории делается в позиции  $pos_{middle}$  с использованием матрицы  $\mathbf{H}_{i-1, middle}$ , а затем вычисляется очередной адаптивный шаг для  $pos_{i+1}$ (см. рис. 2). Согласно второму способу вычисляется позиция  $pos_i$  с использованием матрицы  $\mathbf{H}_{i-1, i}$ , а затем вычисляется очередной адаптивный шаг для  $pos_{i+1}$ . В первом варианте точность локализации выше, но время расчета больше.

#### Интеграция измерений бортовых навигационнопилотажных датчиков в процедуры обработки изображений

Для метода визуальной навигации так же, как и для других методов, характерно накопление со временем абсолютной ошибки при вычислении параметров траектории. В данном случае ошибка накапливается в абсолютной матрице преобразования, поскольку последняя формируется перемножением локальных матриц предшествующих шагов. В значительной степени влияние на абсолютную ошибку навигации оказывают неточности в вычислениях относительной ориентации (в большей степени это относится к углу курса движения) при локальных перемещениях АНПА. Воспрепятствовать накоплению ошибки может привлечение дополнительной информации. Такой дополнительной информацией может быть измерение углов ориентации и скорости АНПА (доплеровский лаг), обеспечиваемое бортовой навигационной системой. Известно, что используемые в навигационных системах АНПА приборы обеспечивают точность по углу курса от 0,1° и более (магнитный компас) (для углов крена и дифферента эта точность выше). И хотя эта точность (как показали

вычислительные эксперименты) ниже точности вычислений локальных изменений ориентации визуальным методом, преимущество компаса заключается в том, что он измеряет абсолютные значения углов ориентации аппарата.

Поэтому целесообразно интегрировать в схему вычислений данные абсолютных угловых измерений таким образом, чтобы, сохраняя преимущество визуального метода в вычислении локальных перемещений, уменьшать накопление ошибки в вычислении абсолютной ориентации. В настоящей реализации это делается следующим образом.

На каждом шаге будем корректировать ту часть результирующей абсолютной матрицы преобразования, вычисленной визуальным методом, которая отвечает за вращение. Матрицу преобразования М между двумя системами координат (СК) можно представить как

 $M = \begin{vmatrix} R & 0 \\ t & 1 \end{vmatrix}$ . Здесь матрица R отвечает за вращение, а вектор t – за

перенос точки. Известно, что, в общем случае  $t = -d \cdot R$ , где d – вектор начала одной СК в другой СК.

Пусть 
$$M_{_{BH3}} = \begin{vmatrix} R_{_{6U3}} & 0 \\ t_{_{6U3}} & 1 \end{vmatrix}$$
 будет абсо-

лютной матрицей преобразования из мировой СК в СК камеры, вычисленной визуальным методом в текущей позиции. Как было описано выше, она получается умножением абсолютной матрицы предыдущей позиции на матрицу локального преобразования текущей позиции. Сформируем теперь скорректиро-

ванную матрицу 
$$M_{\text{кор}} = \begin{vmatrix} R_{\kappa \rho} & 0 \\ t_{\kappa \rho} & 1 \end{vmatrix}$$

где R<sub>кор</sub> получена по угловым измерениям бортовой навигационной системы на данном шаге. Для вычисления t<sub>кор</sub> воспользуемся приве-

денным выше соотношением, тогда  $t_{_{BH3}} = - d \cdot R_{_{BH3}}$  и  $t_{_{KOP}} = - d \cdot R_{_{KOP}}$ . Отсюда  $t_{_{KOP}} = t_{_{BH3}} \cdot R^{-1}_{_{BH3}} \cdot R_{_{KOP}}$ . Поскольку такая коррекция выполняется на каждом шаге, ошибка в вычислении 6DOF motion, как показали последующие эксперименты, заметно снижается.

Для учета в вычислительной схеме визуального метода измерений скорости, получаемых с помощью бортового доплеровского лага, был рассмотрен способ, аналогичный вышеописанному. А именно: вычисленный вектор смещения А в матрице локального преобразования заменяется вектором **R**, получаемым с использованием измерений скорости  $\mathbf{R} = \mathbf{V} \cdot \Delta t$ . Для оценки потенциального эффекта применения такого способа был проделан модельный эксперимент, в котором в качестве **R** брались модельные (точные) значения локального смешения на каждом шаге. Результаты этих экспериментов показали, что при этом достигается незначительное преимущество.

# Некоторые результаты экспериментов

Для оценки эффективности предложенных модификаций алгоритмов визуального метода тестировались различные варианты программной реализации, включающие: фиксированный и адаптивный шаг расчета траектории, применение 6-облачного алгоритма и интеграцию в вычислительную схему визуального метода штатных измерений угловой ориентации и скорости движения АНПА. Вычислительные эксперименты проводились на виртуальных сценах (рис. 3), подготовленных с помощью моделирующего комплекса [16], и с реальными данными.

В экспериментах с модельными сценами базовое расстояние для виртуальной камеры бралось 40 см, частота съемки 25 кадров/с, разре-



Puc. 3. Виртуальная сцена для проведения модельных экспериментов

шение снимков 600×400 и 800×600 пикселей. Расчеты проводились на компьютере PCIntel® Core<sup>тм</sup>i5 CPU @280GHz с графической платой NVIDIAGeForceGTX 470 в среде ОС WINDOWS. Степень перекрытия для алгоритма адаптивного шага устанавливалась в 50% и 75%. Измерения виртуального компаса зашумлялись (гауссовский шум), имитируя ошибку измерения от 0,1° до 1°.

В натурных экспериментах использовалась стереокамера

ProsilicaGC1380, установленная на АНПА «Junior» (рис. 4). Базовое расстояние между двумя идентичными камерами 300 мм, разрешение получаемых снимков 1360×1024. Эксперименты проводились в лабораторных условиях с использованием специальной подложки с нанесенной текстурой.

Аппарат перемещался на высоте 90 см от пола с постоянной скоростью. Общая длина траектории движения аппарата была око-



Рис. 4. АНПА «Junior» с установленной стереосистемой

ло 12 м. Тестирование алгоритмов осуществлялось в режиме постобработки по снимкам, получаемым от стереокамеры. Адаптивный метод дал ошибку в пределах 12 см. Точность метода оценивалась путем сравнения параметров вычисленной траектории и истинной (модельной) для разных вариантов алгоритмической реализации. Результаты всех экспериментов приведены в таблице. На рис. 5, а, б показаны графики повеления локальной и абсолютной ошибки смещения вычисленной траектории в модельной сцене (см. рис. 3).

Отдельный эксперимент был проведен по повышению скорости расчетов с применением аппаратного ускорения. Использование CUDA-версии библиотеки OpenCV на трудоемком этапе сопоставления особенностей на снимках позволило уменьшить время счета в 9 раз для используемого вычислительного оборудования.



Рис. 5. Графики поведения вычисляемой ошибки траектории в зависимости от времени движения: а – абсолютная ошибка смещения – сравнение адаптивного метода с базовым (фиксированный шаг); б – локальная ошибка (за один шаг)

#### Оценка эффективности визуального метода для разных модификаций

	Без модифи- каций	6-облачный алгоритм	Учет измерений углов	С реализацией всех модификаций
Модельная сцена 1: расстояние до дна 3,5–7 м; частота съемки = 25 кадров/с; разрешение 600х400; базовое расстояние = 40 см; время движения = 180 с				
Фиксированный шаг	45 / 178	17 (34) / 846 (448)	10,8 / 178	
Адаптивный шаг	35 / 34	15 (31) / 150 (71)	8 / 34	4,4 / 155
Модельная сцена 2: расстояние до дна 1 – 10 м; частота съемки = 25 кадров/с; разрешение 600х400; базовое расстояние = 40 см; время движения = 134 с				
Фиксированный шаг	3 / 260	2,2 (2,6) / 1540 (770)	0,9 / 260	
Адаптивный шаг	2,6 / 38	2,0 (2,0) / 202 (105)	1,86 / 38	1,44 / 203
Реальная сцена: расстояние до пола ~ 1м; частота съемки = 2 кадра/с; разрешение 1360х1024; базовое расстояние = 30 см; длина траектории ~12 м				
Фиксированный шаг	25 / 458			
Адаптивный шаг	12 / 290	4,5 / 2420		

Примечание. В числителе – абс. ошибка, см; в знаменателе – время расчета, с. В скобках приведены данные для ускоренной, но менее точной версии алгоритма.

#### выводы

Анализ полученных результатов экспериментов показывает:

а) адаптивный алгоритм дает лучший результат по времени в сравнении с базовым вариантом (фиксированный шаг), не уступая ему по точности;

б) 6-облачный алгоритм повышает точность, но требует значительно больше вычислительных затрат, поэтому его целесообразно использовать только в режиме постобработки;

в) алгоритм учета бортовых угловых измерений дает существенное повышение точности визуального метода практически без увеличения счетного времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-07-00341, № 16-07-00350) и Программы «Дальний Восток» (проект 15-І-4-025).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Boreyko A.A., Moun S.A., Scherbatyuk A. Ph. Precise UUV positioning based on images processing for underwater construction inspection // Proc. of the PACOMS08. Bangkok, 2008. P. 14-20.

2. Борейко А.А., Мун С.А., Щербатюк А.Ф. Определение движения подводного аппарата на основе обработки видеоизображений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 2-8.

3. Борейко А.А., Воронцов А.В., Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Алгоритмы обработки видео изображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1. С. 29-39.

4. Goi V.A., Gatsenko A., Shestopalov G., Sporyshev M.S., Tolstonogov A. Yu., Scherbatyuk A.F. Stabilization of an autonomous underwater vehicle relative to the bottom of the sea by the means of stereoscopic vision // Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conf. Genova, Italy, 2015. P. 138-140.

5. Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2004. Vol. 1. P. 652-659. DOI: 10.1109/CVR.2004.1315094. IEEE Conf. Publ.

6. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm // Proc. of the Third Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling. 2001. P. 145-152. DOI: 10.1109/IM.2001.924423. IEEE Conf. Publ.

7. Salvi J., Petillot Y., Thomas S., Aulinas J. Visual slam for underwater vehicles using video velocity log and natural landmarks // Proc. of OCEANS'08. 2008. P. 1-6. DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5151887. IEEE Conf. Publ.

8. Konolige K., Agrawal M., Bolles R., Cowan C., Fischler M., Gerkey B. Outdoor mapping and navigation using stereo vision // 10th Int. Symp. on Experimental Robotics (ISER). P. 156-162. DOI: 10.1007/978-3-540-77457-0-17.

9. Бобков В.А., Машенцев В.Ю. Визуальная навигация подводного аппарата для целей локального маневрирования // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2(16). С. 33-37.

10. Hogue A., German A., Jenkin M. Underwater environment reconstruction using stereo and inertial data // IEEE Int. Conf. «Systems, Man and Cybernetics». 2007. P. 2372–2377. DOI: 10.1109/ICSMC.2007.4413666. IEEE Conf. Publ.

11. Leutenegger S., Lynen S., Bosse M., Siegwart R., Furgale P. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization // The International Journal of Robotics Research. 2014. Dec. 15. P. 34-38.

12. Colle E., Galerne S. Mobile robot localization by multiangulation using set inversion // Robotics and Autonomous Systems. 2013. Vol. 61. January. P. 39-48.

13. 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.

14. Машенцев В.Ю., Бобков В.А., Щербатюк А.Ф., Толстоногов А.А. Визуальная навигация по стереоизображениям // VI Всерос. науч. - техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 381-385.

15. Bobkov V., Mashentsev V., Tolstonogov A., Scherbatyuk A. Adaptive Method for AUV Navigation Using Stereo Vision // Proc. of the 26th ISOPE Int. Ocean and Polar Eng. Conf. Rhodes, Greece, 2016. P. 116-121.

16. Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В., Павин А.М., Черкашин А.С. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1(19). С. 23-32.