

А. Г. БУКИН, А. С. ЛЫЧАГОВ, Р. Н. САДЕКОВ, О. А. СЛАВИН

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Приводится описание аппаратно-программного комплекса технического зрения, предназначенного для решения задачи навигации и картографирования. Комплекс реализован на базе стереосистемы технического зрения. Подробно описываются особенности программного обеспечения комплекса, используемые для вычисления и визуализации библиотеки. Апробируется подход калибровки стереосистемы с использованием пары изображений, содержащих несколько калибровочных шаблонов. Приводятся состав оборудования, используемый при испытаниях для оценки точности определения навигационных параметров комплексом компьютерного зрения, и полученные результаты.

Ключевые слова: техническое зрение, стереосистема, одновременная навигация и картографирование, визуальная одометрия, стереореконструкция.

Введение

В силу высокой производительности современной вычислительной техники в последнее время стало возможным для навигации и управления подвижными объектами использовать принципиально новые измерители – видеокамеры, лидары и др. [1–3]. Системы, использующие в своем составе видеокамеры, в технической литературе получили название систем технического (машинного) зрения [4, 5]. Особая популярность данных систем связана с огромным потенциалом информации, заложенным в изображениях, что позволяет применять самые разнообразные подходы и методы для решения задач навигации. Низкая стоимость видеодатчиков также является весомой причиной их массового применения. Популярность данного направления применительно к подвижным наземным объектам объясняется высокой информативностью окружающей объект обстановки, а также возможностью использования цифровых карт местности,

Букин Артем Геннадьевич. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник МОУ «Институт инженерной физики» (Московская область, г. Серпухов).

Лычагов Александр Сергеевич. Аджант филиала военной академии РВСН им. Петра Великого (Московская область, г. Серпухов).

Садеков Ринат Наилевич. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник МОУ «ИИФ». Член молодежной секции международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Славин Олег Анатольевич. Доктор технических наук, ведущий программист ООО «Когнитивные технологии» (Москва).

Статья по докладу на XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова.

существенно повышающих точность решения навигационной задачи.

В настоящее время известно несколько подходов к использованию систем технического зрения (СТЗ) в целях навигации подвижных объектов.

Визуальная одометрия – это метод автономной навигации подвижного объекта в детерминированной среде с использованием изображений (одному или двум), получаемым от СТЗ в последовательные моменты времени [6, 7]. Для автономных СТЗ характерно нарастание погрешностей определения навигационных параметров, поэтому применительно к автомобильным навигационным системам известны решения, в которых использованы цифровые карты дорог для повышения точности определения навигационных параметров [1].

Вторым подходом к построению навигационных систем может считаться позиционный подход, основанный на использовании СТЗ в качестве идентификаторов реперов (ориентиров). Для автомобильных навигационных систем в качестве реперов может выступать дорожная разметка, дорожные знаки, перекрестки дорог [8]. Механизм идентификации реперов в целях высокоточной навигации также подробно описан в работе [9].

Особую популярность сегодня получили подходы, основанные на одновременном решении задачи навигации и картографирования. В англоязычной литературе такое направление получило название *simultaneous localization and mapping* (SLAM). Данный класс задач является довольно обширным и может включать различные модификации алгоритмов, при этом важно, что обе задачи: навигация (визуальная одометрия) и картографирование (стереореконструкция) – решаются одновременно по информации только СТЗ [10]. Преимуществом данного подхода является не только возможность построения карты окружающего пространства, но и возможность оценки навигационных параметров путем сравнения картографической информации, сформированной в текущий момент времени и записанной в памяти по результатам прошлых измерений [10]. Такой подход потенциально обеспечивает высокую точность навигации при теоретически неограниченной длительности движения подвижного объекта.

С использованием СТЗ, состоящей из двух соосно расположенных камер, авторами была выполнена работа по созданию аппаратно-программного комплекса навигации и картографирования. В статье подробно излагаются вопросы выбора камер, организации процедур предобработки изображений, калибровки СТЗ, программного обеспечения. Выбор того или иного решения анализируется с позиций существующих в предметной области решений. Проверка работоспособности СТЗ осуществляется с использованием реальных и тестовых изображений, по результатам которых получают 3D-карты окружающей обстановки. В заключение приводятся сведения о существе натурного эксперимента по проверке комплекса технического зрения на точность определения навигационных параметров.

Используемое оборудование

Аппаратно-программный комплекс состоит из двух частей: измерительный блок и вычислитель. Измерительный блок строится на базе двух камер, располагающихся на расстоянии 20 см друг от друга, при этом визирные оси камер располагаются параллельно друг другу. Использование стереосистемы (двух камер) обеспечивает более высокую точность навигационного решения по от-

ношению к моносистемам [0, 0, 0]. В качестве камер используются видеокамеры со следующими характеристиками: Imaging Development Systems (IDS) UI-5240SE-C-HQ (сенсор – CMOS цветной 1.3 Мпикс, разрешение 1280×1024, размер сенсора 1/1.8", глобальный затвор).

Для обеспечения высокой робастности работы алгоритма используются объективы с большим горизонтальным углом обзора: AZURE-0420MM (фокусное расстояние 4 мм, горизонтальный угол 77.32°).

В качестве вычислителя используется промышленный контроллер UNO-2182 фирмы Advantech (Core 2Duo 1.5 ГГц, ОЗУ – 2Гб, 2xLAN). Внешний вид устройств показан на рис. 1.



Рис. 1. Камера, объектив, вычислитель (вверху слева направо) и система технического зрения в сборе (внизу)

Для синхронизации процесса получения изображений с двух камер используется режим работы master-slave. Достоинством предлагаемого режима является простота реализации, не требующая использования внешнего синхрогенератора. Для реализации режима необходимо с заданной частотой генерировать команду на получение изображений, что реализуется вычислителем, а также специальной схемой для перевода камеры в режим «триггеров». Такой режим синхронизации камер позволяет получать изображения с запаздыванием ≈ 20 мкс, что является вполне приемлемым для решения задачи.

Для получения максимально четкого изображения в условиях переменной освещенности и движения объекта был изменен ряд настроек камеры, таких как экспозиция, режим усиления, частота процессора камеры.

Питание аппаратно-программного комплекса организовано от аккумуляторных батарей напряжением 12 В.

Программное обеспечение

В качестве операционной системы использовалась Ubuntu версии 12.04. Специальное программное обеспечение разработано на языке программирования Qt версии 4.7. По решаемым задачам специальное программное обеспечение можно разделить на следующие модули:

- получение изображений камеры,
- предобработка изображений,
- вычисление (решения задачи навигации и картографирования),
- визуализация.

Реализация процедуры получения изображений осуществляется на основе библиотеки uEye и собственных C++ классов для настройки камер и получения изображений заданного формата. Процедура предобработки изображений осуществляется на базе функций библиотеки OpenCV [12]. По известным параметрам камер [4, 5] (полученным в результате калибровки) к текущей паре изображений последовательно применялись функции устранения дисторсии, ректификации и обрезки. Более подробно сущность данных процедур описана ниже.

В настоящее время известно множество открытых решений (библиотек), реализующих принципы навигации и стереорекострукции по изображениям СТЗ [12–16]. Однако большая часть из широко известных решений реализуется в составе более крупных библиотек [12–14] и, как следствие, требует внешних зависимостей. В целях минимизации внешних зависимостей для проверки аппаратно-программного комплекса авторы использовали открытые библиотеки LIBVISO2 [15] и LIBELAS [16], написанные на языке C++ и не требующие установки дополнительных пакетов программ для своего функционирования. Анализ обзора [17] позволяет сделать вывод о том, что данные библиотеки обладают высокими характеристиками быстродействия и не имеют передовых позиций в отношении точности получаемых решений в области визуальной навигации (15 место) и стереорекострукции (47 место), что и послужило причиной их выбора. Визуализация данных в аппаратно-программном комплексе осуществляется с использованием библиотеки Point Cloud Library [17].

В целях оптимизации вычислений и повышения быстродействия работы программного обеспечения часть из существующих задач была разделена по потокам. Потокковая схема, с одной стороны, позволяет обеспечить постоянную визуализацию результатов, с другой – непрерывно осуществлять вычисления при получении новых изображений. Проверка программного обеспечения на базе предложенного вычислителя показала, что решение задачи навигации в среднем реализуется с частотой 10 Гц, а решение задачи стереорекострукции с частотой 2 Гц. Основные модули программы представлены на рис. 2.

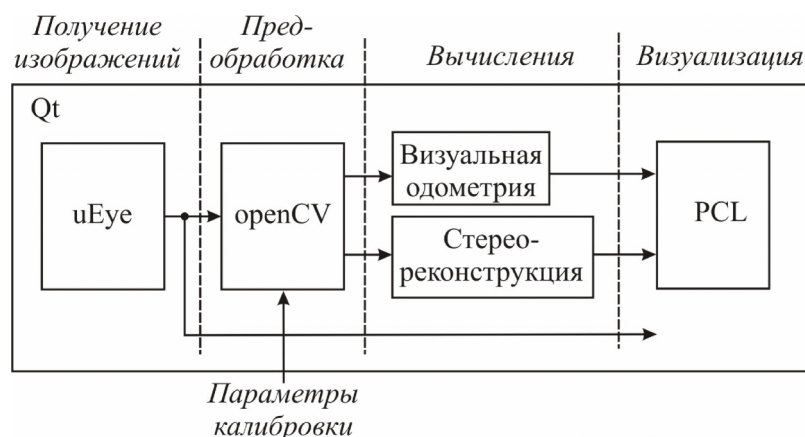


Рис. 2. Последовательность работы программы и ее основные модули

На первом этапе двумя камерами формируются «сырые» (исходные) изображения в цветном формате с разрешением 1280×1024. На втором этапе осуществляется предобработка изображений, по результатам которой урезанные ректифицированные полутоновые изображения поступают для вычисления навигационных параметров. Известные авторам алгоритмы навигации и стереорекострукции работают преимущественно с полутоновыми изображениями, поэтому при разработке навигационных СТЗ рекомендуется использовать монохромные камеры, обладающие более высокими характеристиками при одинаковой по отношению к цветным камерам стоимости.

Решение задач навигации и стереорекострукции осуществляется независимо друг от друга, по окончании вычислений трехмерные координаты сцены с использованием навигационных данных преобразуются из локальной (текущей) системы координат в глобальную. На выходе функции библиотеки LIBELAS формируется двухмерная карта глубины, которая с использованием параметров СТЗ преобразует 2D-координаты в трехмерное облако точек сцены.

В главном окне программы осуществляется отображение полученных данных. Визуализация трехмерного облака точек осуществляется с использованием библиотеки PCL и Visualization Toolkit; визуализация исходных изображений камер – с использованием стандартных функций QPixmap библиотеки Qt; визуализация результатов навигационного решения – с использованием специальных виджетов библиотеки Qt Widgets for Technical Applications.

Предобработка изображений

Процедура предобработки связана с решением целого ряда частных задач: а) преобразование пары изображений из цветного формата в полутоновое; б) устранение дисторсии; в) выполнение ректификации изображений; г) обрезка изображений.

Дисторсия оптической системы нарушает подобие между объектом сцены и изображением [4, 5]. Обычно для ее описания используются две составляющие: радиальная и тангенциальная. Радиальная составляющая представляет собой полином с тремя неизвестными, а тангенциальная – полином с двумя неизвестными. Пять неизвестных параметров дисторсии оцениваются во время калибровки. Компенсация дисторсии осуществляется наложением специального фильтра на исходное изображение [19].

На следующем этапе осуществляется ректификация пар изображений. Суть ректификации заключается во взаимном выравнивании изображений таким образом, чтобы одноименные пиксели обоих изображений лежали на одинаковых горизонтальных линиях. Под одноименными точками понимаются точки изображения, характеризующие общую точку наблюдаемого предмета. Ректификация изображений позволяет существенно упростить процедуру поиска одноименных точек на парных изображениях, что существенно увеличивает скорость работы алгоритмов.

Поскольку для решения задач навигации и стереорекострукции используются только те части изображения, которые содержат общую область сцены, то на последнем этапе процедуры предобработки осуществляется обрезка изображений. Процедура обрезки изображений также применяется в случаях, когда априорно известно, что та или иная часть изображения не будет использоваться,

например область капота машины или область изображения выше линии горизонта. Обрезка изображений уменьшает объем входной информации, что также положительно сказывается на быстродействии алгоритмов.

Реализация навигационных алгоритмов с использованием СТЗ требует априорных сведений о внутренних и внешних параметрах оптической системы, что реализуется посредством процедуры калибровки.

Калибровка системы технического зрения

Под калибровкой СТЗ понимается процесс определения внутренних и внешних параметров входящих в ее состав камер [4, 5]. В результате калибровки определяются внутренние и внешние параметры камер, коэффициенты дисторсии оптической системы, рассчитываются новые (ректификационные) размеры изображений и другие производные параметры.

Калибровка камер проводилась по методу Zhang [19], на основе калибровочной доски (шаблона) 7×4 с шириной ячейки 80 мм. Учитывалась радиальная и тангенциальная дисторсия, описываемая полиномом с пятью неизвестными [12]. В качестве программ для калибровки камер рассматривались пакеты программ и открытые интернет-ресурсы:

- OpenCV stereo cam calibration example [21];
- Matlab Calibration Toolbox [22];
- GML C++ Camera Calibration Toolbox [23];
- Camera and Range Sensor Calibration Toolbox [24].

Специальное программное обеспечение на основе OpenCV использует для калибровки несколько пар изображений (рекомендуемое значение около 10) калибровочного шаблона. Внутренние и внешние параметры камер сохраняются в файл формата .yaml, а результаты преобразования исходных изображений выводятся на экран. По мнению авторов, калибровка камер в данной среде является очень чувствительной к расположению калибровочного шаблона и требует специальных навыков его перемещения.

Калибровка камер с использованием пакета Matlab Calibration Toolbox требует большого объема ручной работы, связанной с настройкой программы, введения исходных данных, выделения областей интереса, содержащих калибровочный шаблон, поочередной калибровкой правой и левой камер, неудобным форматом записи данных.

Пакет программ GML C++ Camera Calibration Toolbox, разработанный «Лабораторией компьютерной графики и мультимедиа», имеет ограничения по используемому калибровочному шаблону, излишние требования к расположению камер относительно шаблона и не имеет возможности непосредственной калибровки стереосистемы.

Полностью автоматизированное online приложение Camera and Range Sensor Calibration Toolbox позволяет калибровать камеры и лазерные сканеры всего по одному изображению, содержащему несколько калибровочных шаблонов одновременно. После загрузки данных на сайт результаты калибровки доступны в виде двух .txt файлов, содержащих внутренние и внешние параметры камер и трехмерные координаты точек калибровочных шаблонов. В целом данное приложение заслуживает самой высокой оценки, однако в ряде случаев не удавалось получить «новые» ректификационные параметры изображений.

Для самостоятельного определения калибровочных параметров на языке Matlab авторы реализовали собственный программный комплекс калибровки стереосистем, используя ряд функций пакета [22] и библиотеки LIBCBDETECT [25]. Созданная программа освобождена от описанных выше недостатков, так как, с одной стороны, позволяет калибровать систему по паре фотографий, содержащих несколько калибровочных шаблонов, и в этом смысле является полностью автоматизированной, а с другой – позволяет рассчитать и наглядно отобразить результаты калибровки. Результаты работы программы представлены на рис. 3.



Рис. 3. Изображения, содержащие калибровочные шаблоны и визуализация пространственного положения камер и шаблонов в программной среде Matlab

Разработанный аппаратно-программный комплекс был проверен на тестовых [0] и на реальных изображениях. Полученные результаты показаны на рис. 4.

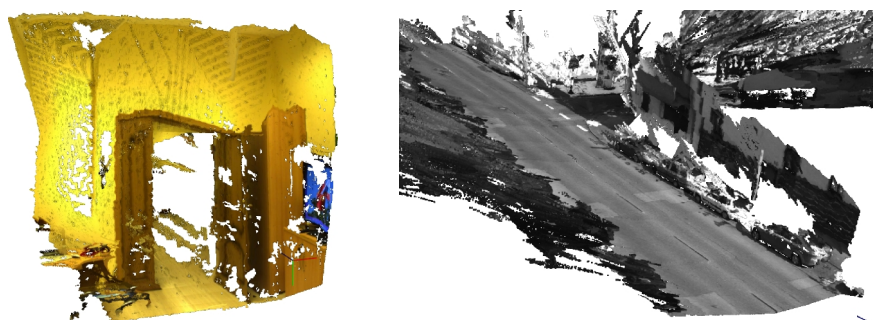


Рис. 4. 3D-карта: помещение лаборатории и маршрут движения автомобиля

На рисунке представлен фрагмент 3D-карты лаборатории «Навигационных систем и комплексов», сделанный по результатам работы аппаратно-программного комплекса, и фрагмент 3D-карты улицы, сделанный по изображениям [17].

Для проверки работы аппаратно-программного комплекса в реальных «уличных» условиях и оценки точности определения навигационных параметров был организован ряд натурных экспериментов с использованием разработанной СТЗ и подвижного навигационного комплекса, состоящего из бесплатформенной инерциальной навигационной системы «БИНС-Тек» (производство ООО «Текнол»), инкрементного датчика колеса и спутникового приемника. Внешний вид систем и места их размещения представлены на рис. 5.



Рис. 5. Подвижный навигационный комплекс с одометром, бесплатформенной инерциальной навигационной системой и установленной на крыше автомобиля СТЗ

Заключение

Бесплатформенная инерциальная навигационная система совместно со спутниковыми измерениями в режиме коррекции от одометра позволяет определять координаты с точностью до единиц метров, а значит, может выступать в качестве эталона для СТЗ. Цель эксперимента – в синхронном получении данных от навигационной системы и СТЗ, сравнении двух полученных траекторий и оценке точности определения угловых и линейных параметров. Результаты нескольких заездов показали, что полученные значения СКП определения координат находятся в заданном диапазоне [15, 17].

В настоящее время с использованием данного оборудования в различных погодных условиях проводится сбор натурных данных. Маршрут движения транспортного средства пролегает в г. Серпухове и его окрестностях. Протяженность каждого маршрута ≈ 15 км. После упорядочивания полученные «сырые» данные, а также данные о калибровке СТЗ, параметрах ее относительного расположения планируется сделать доступными для тестирования и проверки собственных навигационных алгоритмов, разрабатываемых в предметной области научными коллективами и отдельными учеными.

*Исследования проводятся при финансовой поддержке государства
в лице Минобрнауки России.*

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57914X0011.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Brubaker M.A., Geiger A., Urtasun, R.** Lost! Leveraging the Crowd for Probabilistic Visual Self-Localization // CVPR, 2013 IEEE Conference, 2013, p. 3057 – 3064.
2. **Nagappa S., Palomeras, N.** and other. Single cluster PHD SLAM: Application to autonomous underwater vehicles using stereo vision//OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE, p.1-9.
3. **Daobin W.,Huawei L.** and other. Lidar Scan matching EKF-SLAM using the differential model of vehicle motion /Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013, p. 908-912.
4. **Форсайт, Д.** Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс // – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
5. **Шапиро, Л.Г.** Компьютерное зрение /Л.Шапиро, Дж.Стокман. Пер. с англ. –М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.- 752 с.

6. **Geiger A., Lategahn, H., Kitt B.** Visual Odometry based on Stereo Image Sequences with RANSAC-based Outlier Rejection Scheme// Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010 IEEE, 2010, p. 486 – 492.
7. **Nister D., Naroditsky O., Bergen J.** Visual odometry// CVPR 2004, p. I-652 - I-659 Vol.1.
8. **Nedevschi S., Popescu V., Danescu R., Tiberiu M., Oniga F.** Accurate ego-vehicle global localization at intersections through alignment of visual data with digital map / IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2013, p. 673-687.
9. **Young-Woo S., Rangunathan R.** A vision system for detecting and tracking of stop-line / 2014 IEEE 17th International conference on intelligent transportation systems (ITSC), 2014, p.1970-1975.
10. **Geiger A., Ziegler J., Stiller C.** StereoScan: Dense 3d reconstruction in real-time // Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE, p. 963 - 968.
11. **Donghua L., Hyongjin K., Hyun M.** GPU-Based Real-Time RGB-D 3D SLAM 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2012, p. 46-48.
12. **OpenCV** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://opencv.org> . Дата обращения: 01.01.2015.
13. **Mobile Robot Programming Toolkit** / Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.mrpt.org/>. Дата обращения: 01.01.2015.
14. **Robot Operation System** / Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.ros.org/>. Дата обращения: 01.01.2015.
15. **LIBVISO2:C++ Library for Visual Odometry** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://cvlibs.net/software/libviso/>. Дата обращения: 01.01.2015.
16. **LIBELAS:C++ Library for Efficient Large-scale Stereo Matching** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://cvlibs.net/software/libelas>. Дата обращения: 01.01.2015.
17. **The KITTI Vision Benchmark Suite. Dataset** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/> Дата обращения: 01.01.2015.
18. **PCL: Point Clouds Library**/Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://pointclouds.org>. Дата обращения: 05.09.2013.
19. **Bradski G. and Kaehler A.** Learning OpenCV/ ISBN: 978-0-596-51613-0//2008, p. 571.
20. **Zhang . A** flexible new technique for camera calibration/ IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.
21. **Openvc stereo example** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://github.com/Itseez/opencv/blob/master/samples/cpp/stereo_calib.cpp. Дата обращения: 01.01.2015.
22. **Camera calibration Toolbox for Matlab** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc. Дата обращения: 01.01.2015.
23. **GML C++ Camera Calibration Toolbox**/Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://graphics.cs.msu.ru/research/projects>. Дата обращения: 01.01.2015.
24. **Camera and Range Sensor Calibration Toolbox** /Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://cvlibs.net/software/calibration/> Дата обращения: 01.01.2015.
25. **Libcbdetect: Corner and Checkerboard Detection**/Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.cvlibs.net/software/libcbdetect/> Дата обращения: 01.01.2015.

Abstract. The article gives a description of the machine vision system applicable for navigation and mapping. The device is based on the stereo system. The paper describes the software details and the library that are used for calculation and visualization purposes. The authors piloted computer vision calibration method by using a pair of images with several calibration patterns. In conclusion, the results of the system work on 3DMap construction are provided, and the equipment configuration, used to assess the accuracy of navigation parameters is described.

Key words: computer vision, stereosystem, simultaneous localization and mapping, visual odometry, stereoreconstruction

Материал поступил 15.01.15