

В. В. Варлашин, аспирант, инженер 2-й категории, v.varlashin@rtc.ru,

М. А. Ершова, науч. сотр., m.ershova@rtc.ru,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

В. А. Буняков, нач. лаборатории, bunyakov@rtc.ru, **О. А. Шмаков**, нач. отдела, shmakov@rtc.ru,

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)

Система кругового обзора реального времени для мобильных робототехнических комплексов¹

Обсуждается проблема повышения адекватности восприятия окружающей среды оператором мобильного робота при удаленном управлении. Предложен вариант системы кругового обзора реального времени для мобильных робототехнических комплексов на базе системы телекамер с перекрывающимися полями зрения с использованием fisheye-объективов (объективы типа "рыбий глаз"). Разработан макет модуля кругового обзора. Определены особенности архитектуры и программного обеспечения системы кругового обзора. Исследованы алгоритмы определения внутренних параметров телекамер и устранения дисторсий с использованием новых моделей описания искажений широкоугольных и сверхширокоугольных объективов. Реализованы алгоритмы нахождения внешних параметров телекамер, а также матриц гомографии с использованием инвариантных дескрипторов, использованы статические матрицы гомографии при склейке изображений в панораму. Исследованы и реализованы алгоритмы смешивания граничных областей склеиваемых кадров на базе методов типа "blending". Исследованы методы проективной геометрии и дополненной реальности для получения перспективного вида "от третьего лица". Предложен вариант поверхности для проецирования панорамы кругового обзора. Для реализации программного обеспечения выбран кроссплатформенный игровой движок "Unity". Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: компьютерное зрение, система кругового обзора мобильного робота, проекция изображений

Введение

Область применения мобильных роботов постоянно расширяется. Повышение эффективности информационного взаимодействия оператора с мобильным робототехническим комплексом зависит от сенсорных систем, расположенных на борту комплекса, и методов управления.

Актуальной задачей является повышение адекватности восприятия оператором окружающей среды [1–6]. Удаленное управление с использованием телекамеры не позволяет оператору правильно оценить позицию мобильного робота относительно объектов окружающей среды. Для решения данной проблемы возможно использование как систем технического зрения на базе стереопар для получения стерео-

изображений [2] или построения карты глубины [3], так и различного рода систем кругового обзора, визуально обеспечивающих эффект присутствия путем применения методов дополненной реальности для совмещения виртуальной модели робота с изображениями с телекамер.

Частным случаем таких систем являются устройства, формирующие круговую панораму обзора [4] и перспективный вид "от третьего лица" [5, 6]. Такой вид дает наиболее полную информацию для оператора о локальном местоположении робота в рабочем пространстве.

Основой для получения перспективного вида являются круговые панорамы. Построение круговых панорам возможно с использованием различных методов и устройств, имеющих свои преимущества и недостатки. Ниже приведена классификация устройств по различным критериям:

- по скорости (времени) обработки: системы реального времени (обработка и формиро-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания СПбПУ Петра Великого (кафедра "Мехатроника и роботостроение"), проект № 9.4040.2017/4.6.

- вание панорамы из потокового видео с частотой 10 Гц и выше) и системы с постобработкой (обработка и формирование панорамы с использованием видеозаписей);
- по числу камер;
 - по конструкции: а) системы с одной телекамерой и всенаправленным зеркалом (зеркально-линзовые оптические системы, или катадиоптрические системы); б) с одной телекамерой и поворотным механизмом; в) с несколькими парами телекамер и зеркал; г) с несколькими телекамерами с перекрывающимися полями зрения;
 - по углу обзора по вертикали;
 - по области применения: а) системы для записи видео (в том числе охранные системы); б) системы формирования кругового обзора для транспортных средств; в) системы для размещения на борту робототехнических комплексов.

Анализ существующих решений [7—18] и методов формирования выходного изображения позволил определить достоинства и недостатки каждого из них. Результат сравнения представлен в табл. 1.

Целью работы является исследование и разработка программно-аппаратного комплекса системы кругового обзора для мобильных робототехнических комплексов на базе системы камер с перекрывающимися полями зрения с использованием широкоугольных и сверхширокоугольных объективов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить структуру разрабатываемой системы кругового обзора для мобильных роботов легкого и сверхлегкого классов на базе системы телекамер с перекрывающимися полями зрения;
- исследовать эффективность алгоритмов устранения дисторсии по критериям макси-

Таблица 1
Table 1

Сравнение различных конфигураций систем кругового обзора
Comparison of various configurations of the circle-vision systems

Конфигурация	Достоинства	Недостатки	Работа в реальном времени
Катадиоптрические системы (всенаправленное зеркало)	Простая аппаратная конфигурация; минимальное число телекамер; простой алгоритм преобразования полученного изображения в панорамное	Ограниченное поле зрения в вертикальном направлении	Низкие требования к вычислительным мощностям
Катадиоптрические системы (система зеркал)	Малый параллакс при точном расположении зеркал; разрешение принципиально выше, чем при использовании кругового зеркала	Ограниченное поле зрения в вертикальном направлении; необходимость склеивания изображений, полученных с соседних телекамер	Требования к вычислительным мощностям зависят от разрешения входных изображений и методов склейки
Телекамера с поворотным механизмом	Простая аппаратная конфигурация; минимальное число телекамер; при использовании одной камеры исходные изображения лишены параллакса	Ограниченное поле зрения в вертикальном направлении; асинхронное получение кадров; трудности с захватом движущихся объектов; наличие приводных систем	Низкие требования к вычислительным мощностям
Системы с несколькими телекамерами с перекрывающимися полями зрения	Принципиально более высокое разрешение выходного изображения; почти неограниченное поле зрения в вертикальном направлении	Необходимость склеивания изображений, полученных с соседних кадров; параллакс изображений; большой объем предварительной обработки входных изображений при использовании fisheye-объективов	Требования к вычислительным мощностям зависят от разрешения входных изображений и методов склейки; постобработка при высоком разрешении (работа с видеозаписями)
Системы кругового обзора для транспортных средств/ системы кругового обзора для робототехнических комплексов	Принципиально более высокое разрешение выходного изображения	Необходимость склеивания изображений, полученных с соседних кадров; ярко выраженный параллакс изображений; большой объем предварительной обработки входных изображений при использовании fisheye-объективов; ограниченное поле зрения в вертикальном направлении в силу особенностей применения	Требования к вычислительным мощностям зависят от разрешения входных изображений и методов склейки

мизации поля зрения телекамеры после выполнения операции устранения искажений и качества устранения дисторсии;

- выбрать методику определения внешних параметров телекамер;
- исследовать быстродействие алгоритмов смешивания граничных областей входных изображений и выбрать один для реализации в системе;
- разработать программный комплекс для получения вида "от третьего лица" с использованием методов проективной геометрии и современных методов дополненной реальности.

Структура системы кругового обзора

Аппаратная платформа разрабатываемой системы реализована на базе четырехканального видеомодуля с телекамерами с fisheye-объективами и специализированного видеопроцессора для захвата и трансляции потокового видео на персональный компьютер посредством телевизионного цифрового радиоканала. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Телекамеры и видеопроцессор объединены и представляют собой модуль для размещения на мобильном робототехническом комплексе. В качестве телекамер возможно использование модульных телевизионных камер сверхвысокой чувствительности с аналоговым выходным сигналом либо веб-камер стандарта USB 2.0/3.0 с установленными fisheye-объективами.

Видеопроцессор имеет три режима работы: трансляция изображения с одной телекамеры, режим квадратор и режим PIP (Picture in Picture — картинка в картинке). Ввиду ограниченности полосы пропускания цифрового телевизионного радиоканала принято решение использовать квадратор для объединения четырех изображений с телекамер в одно.

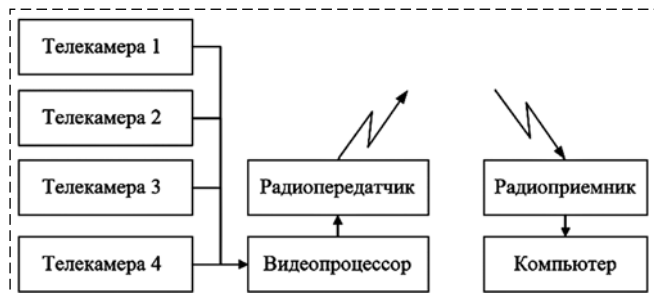


Рис. 1. Структурная схема системы кругового обзора
Fig. 1. A block diagram of the circle-vision system

Разрешение изображения, поступающего с видеопроцессора, составляет 720×576 пикселей. Разрешение изображений, получаемых с телекамер после объединения, составляет 355×284 пикселя. Частота видеоизображения — 25 Гц.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) представлена 3D-CAD модель разрабатываемого модуля (рис. 2, а) и внешний вид макета устройства с установленными ТВ-камерами (рис. 2, б). Малые габаритные размеры модуля ($120 \times 120 \times 80$ мм) позволяют уменьшить параллакс входных изображений, а также обеспечивают возможность размещения модуля на борту робототехнических комплексов легкого и сверхлегкого классов.

Алгоритм работы системы представлен в виде блок-схемы на рис. 3. Для формирования конечного изображения необходимо получить информацию о внутренних и внешних параметрах системы с помощью калибровки отдельных камер и системы в целом. На основе полученных параметров будет проводиться преобразование входных изображений.

На этапе устранения дисторсии на изображениях исправляются радиальные и тангенциальные искажения, вносимые системой линз объектива телекамеры. Результат этого этапа обработки изображений существенно влияет на следующие этапы работы алгоритма.

На этапе определения внешних параметров устанавливается взаимное расположение телекамер и применяется деформация изображений (warping) для лучшей стыковки изображений в области склейки.

Склейка панорамы состоит в применении алгоритмов смешивания граничных областей



Рис. 3. Блок-схема работы алгоритма
Fig. 3. A block diagram of the algorithm

склеиваемых кадров на базе методов типа "blending", таких как Alpha Blending, Pyramid Blending [20].

На этапе изменения ракурса наблюдения сцены для получения вида от третьего лица применяются методы проективной геометрии и дополненной реальности для совмещения виртуальной модели робота с преобразованной панорамой кругового обзора для получения вида "от третьего лица".

Определение внутренних параметров телекамер. Устранение дисторсий

Основным преимуществом использования сверхширокоугольных и fisheye-объективов в подобного рода системах является широкое угловое поле зрения. Недостатками являются наличие дисторсий, что приводит к искривлению прямых линий и, как следствие, снижению разрешения изображения в результате выполнения операции устранения дисторсии.

В современной классификации [21] камеры с широкоугольными объективами имеют угловое поле зрения от 60° до 80° , в то время как камеры с fisheye-объективами имеют угловое поле зрения в районе 180° и больше. Поскольку модель камеры-обскуры проецирует точки углового поля зрения на бесконечность, а при углах свыше 180° не применима, ее нельзя использовать в качестве проекционной модели для fisheye-объективов.

Для исправления искажений используются новые модели камер с собственными параметрами (так называемые внутренние параметры камеры, англ. intrinsic camera parameters) для описания искажений. Модель К. Мея [22] используется для оценки внешних, внутренних параметров и параметров дисторсии объективов камер. Ее можно использовать для калибровки и оценки внутренних параметров параболических, катадиоптрических и диоптрийных камер. Модель Д. Скарамуцци [23] применима для калибровки как всенаправленных камер с круговыми зеркалами, так и для fisheye-объективов. Обе модели используют набор изображений с калибровочным шаблоном типа "шахматная доска" в разных позициях и под разными углами для определения параметров.

В рамках настоящей работы рассмотрены и апробированы реализации моделей в виде инструментариев в пакете MATLAB и функций библиотеки OpenCV. Результаты калибровки

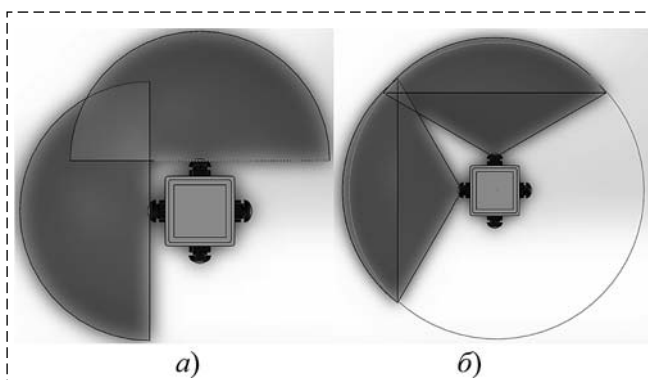


Рис. 5. Угловые поля зрения камер и их зоны перекрытия при угловом поле зрения 180° до устранения дисторсии (а) и 150° после устранения дисторсии (б)

Fig. 5. Angular fields of view of the cameras and the overlap zones with 180° field of view before the distortion elimination (a) and with 150° field of view after the distortion elimination (b)

телекамер и устранения дисторсии на одинаковом наборе входных изображений подтвердили идентичность реализации методов. Для разрабатываемой системы выбрана реализация в виде библиотеки OpenCV по причине открытого исходного кода и высокого быстродействия. Сравнение результатов устранения дисторсии представлено на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

В качестве модели для устранения искажений выбрана модель Д. Скарамуцци. Из рис. 4 (см. вторую сторону обложки) видно, что угловое поле зрения после устранения искажения выше, а прямые линии не искривлены. Высокое быстродействие обеспечивается использованием обратного отображения (англ. Reverse/Inverse Mapping) с помощью таблиц поиска (англ. look up table, LUT) и билинейной интерполяции.

Одной из проблем на данном этапе является уменьшение углового поля зрения при устранении дисторсии. Уменьшение углового поля зрения приводит к уменьшению областей перекрытия (рис. 5) и, как следствие, снижению минимального расстояния, на котором возможна успешная склейка изображений.

Определение внешних параметров телекамер. Определение матриц гомографии

Второй этап построения панорамного изображения заключается в определении внешних параметров телекамер (матрицы поворота и вектора переноса), а также матриц гомографии, которые могут быть получены при калибровке системы кругового обзора. Такая

подготовка изображений перед этапом склейки может осуществляться двумя способами: статически и динамически.

При статической калибровке матрицы поворота и гомографии и вектор переноса вычисляются один раз и в последующем используются для склейки. При динамическом способе используются общие ключевые точки (дескрипторы), видимые на изображениях с двух соседних телекамер.

С помощью этих точек происходит построение уникальных матриц поворота и гомографии и вектора переноса для каждого набора входных изображений. Это позволяет склеивать изображения более точно и адаптивно к изменениям окружающей среды. Использование быстрых детекторов и дескрипторов, а также увеличение вычислительных мощностей оборудования позволяет достичь быстродействия, сопоставимого со статическим способом.

В рамках настоящей работы для реализации выбран первый способ как наиболее быстрый и наименее требовательный к вычислительным мощностям, поскольку приоритетом является работа системы в реальном времени. Достоинством данного способа также является устойчивость к изменениям входных изображений. При входных изображениях с малым числом ключевых точек происходят ошибки вычисления. Примером такой ситуации является склейка панорамы монотонной стены, не имеющей ярко выраженных дескрипторов.

Отличительной особенностью разрабатываемой системы кругового обзора является область построения панорамного изображения. В отличие от существующих систем кругового обзора для транспортных средств, камеры которых направлены вниз для более точного построения изображения опорной поверхности, система кругового обзора мобильного робототехнического комплекса должна давать представление обо всем окружающем пространстве.

Определение внешних параметров телекамер осуществляется с использованием различных подходов. Наиболее очевидным является измерение положения и ориентации каждой камеры вручную, однако не всегда это является возможным. Распространенным способом калибровки системы камер является использование внешних ориентиров. В качестве

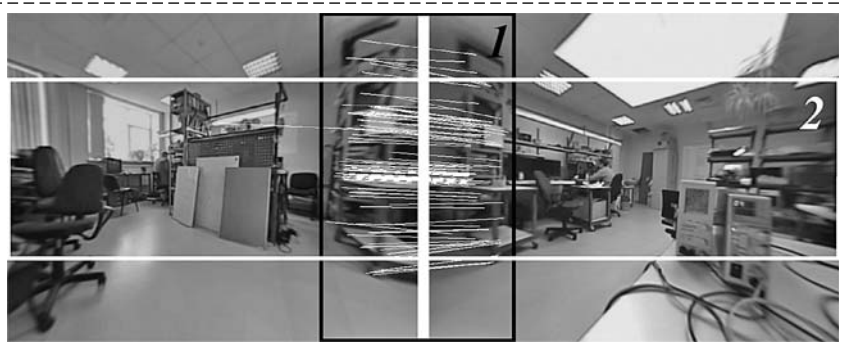


Рис. 6. Результаты работы алгоритма SIFT

Fig. 6. Results of the SIFT algorithm

ориентиров могут выступать как специальные маркеры, так и дескрипторы, полученные путем применения детекторов типа SIFT (The scale-invariant feature transform), SURF (Speeded Up Robust Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) с последующей оценкой параметров методом RANSAC (RANdom Sample Consensus) [24].

В рамках настоящей работы для получения внешних параметров используются детектор SIFT и метод RANSAC. Алгоритмы реализованы в пакете MATLAB, результат представлен на рис. 6.

Эксперименты показали, что ключевым моментом при определении матриц гомографии является выбор области, относительно которой будет происходить преобразование. При калибровке вдоль центральной области подходящим будет фон с большим числом ключевых точек в зоне перекрытия. Схема областей для калибровки представлена на рис. 6, где 1 — зона перекрытия изображений с соседних телекамер, 2 — центральная область.

Склейка изображений.

Смешивание граничных областей

Полученные на предыдущем шаге внешние параметры телекамер используются для построения панорамы. Для правильной стыковки изображений в области перекрытия используется цилиндрическая проекция. Входные изображения, полученные с телекамер, подвергаются деформации. Полученные таким образом изображения составляются в круговую панораму по схеме склеивания, представленной на рис. 7. На этом этапе определяется область наложения входных изображений, а также проявляется эффект параллакса.



Рис. 7. Схема склеивания изображений
Fig. 7. An image stitching scheme

Таблица 2
Table 2

**Сравнение различных методов смешивания
границных областей**

Comparison of various methods for mixing boundary regions

Метод	Достоинства	Недостатки
Linear Blending	Простота реализации	Наличие сильно дwoящихся объектов на изображении, видна граница склейки
Feather Blending	Отсутствие видимой границы склейки, "гладкий" переход	Наличие дwoящихся объектов на изображении
Pyramid Blending	Склейка изображений с использованием пирамид изображений	Необходимость вычисления пирамид. Наличие слабо дwoящихся объектов на изображении
Multi-Band Blending	Дальнейшее развитие Pyramid Blending, большее число уровней пирамид. Отсутствие видимой границы склейки	Необходимость вычисления пирамид. Наличие слабо дwoящихся объектов на изображении
Alpha Blending	Использование яркости для выбора порядка наложения изображений	Наложение изображений, видны границы склейки. Использование яркости для выбора порядка наложения изображений
Gradient-domain Blending	Ориентирован на работу с контурами	Ориентирован на работу с контурами. Необходимость вычисления градиентов

Таблица 3
Table 3

Сравнение времени обработки изображений
Comparison of image processing time

Метод	Время обработки изображений, мс
Feather Blending	19
MultiBand Blending 1-го уровня	26
MultiBand Blending 2-го уровня	30
MultiBand Blending 3-го уровня	35
MultiBand Blending 4-го уровня	42
MultiBand Blending 5-го уровня	50
Alpha Blending	25

Смежные области изображений, полученных в результате цилиндрической деформации, проходят процедуру смешивания граничных областей (blending). Наиболее распространены следующие типы смешивания: Linear Blending, Feather Blending, Pyramid Blending, MultiBand Blending, Alpha Blending, Gradient-domain Blending [25]. Достоинства и недостатки методов представлены в табл. 2.

В рамках работы реализованы три алгоритма смешивания: Feather Blending, MultiBand Blending и Alpha Blending.

Входное изображение, состоящее из четырех кадров телекамер, имеет разрешение 720×576 пикселей. Программное обеспечение реализовано в среде Microsoft Visual Studio 2017 с использованием библиотеки OpenCV 3.3.0. При обработке изображения использован ноутбук Lenovo Yoga 2 Pro с процессором Core i5-4200U с графическим процессором Intel® HD Graphics 4400.

По результатам исследования наиболее быстрым является алгоритм Feather Blending, однако качество смешивания выше у алгоритма MultiBand Blending. Использование MultiBand Blending с числом уровней пирамид больше двух не дает существенных улучшений качества объединения изображений, однако увеличивает время обработки изображений. В табл. 3 приведено сравнение времени обработки изображений. По результатам исследований выбран MultiBand Blending 2-го уровня для реализации в составе программного обеспечения системы.

**Проективная геометрия.
Перспективные преобразования**

Для получения вида "от третьего лица" необходимо осуществить переход от панорамного изображения к виду сверху с последующим проецированием склеенных кадров на определенную поверхность [26].

Получение вида сверху осуществляется с использованием перехода от декартовых координат к цилиндрическим (1):

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi; \\ y &= \rho \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ и φ — пиксельные координаты исходного изображения; x и y — пиксельные координаты выходного изображения.

Параболоидная поверхность второго порядка для проецирования полученного изображения описывается формулой

$$z = \frac{(x^2 + y^2)}{a^2}, \quad (2)$$

где x, y, z — координаты точки в пространстве; a — коэффициент параболоида.

Возможно использование и других поверхностей, например, параболоидной поверхности 4-го порядка

$$z = \frac{(x^4 + y^4)}{a^4}; \quad (3)$$

или объединение цилиндрической поверхности и плоскости:

$$\begin{cases} z = 0, x^2 + y^2 < d^2; \\ z \geq 0, x^2 + y^2 = d^2. \end{cases} \quad (4)$$

В работе предложен свой вариант построения поверхности, описываемой уравнениями в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} z = 0, 0 \leq r < R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \\ z = \sin\left(\frac{(r - R)\pi}{2}\right), R \leq r \leq 2R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \end{cases} \quad (5)$$

где R — радиус скругления.

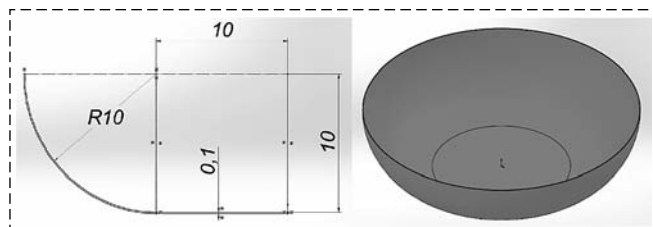


Рис. 8. Построение поверхности в пакете SolidWorks 2015
Fig. 8. A surface modeling with SolidWorks 2015



Рис. 10. Совмещение видеосцены с 3D-моделью робота
Fig. 10. A combining the video scene with a 3D-model of the robot

Для построения вида "от третьего лица" предлагается использовать игровой движок Unity для работы с трехмерной графикой. Поверхность построена в виде модели в пакете SolidWorks 2015 (рис. 8) и экспортирована в пакет Blender для создания карты текстур.

С использованием пакета Blender и UV-преобразования разработана развертка (рис. 9, см. вторую сторону обложки) для наложения вида сверху на внутреннюю часть описанной поверхности. Полученная модель экспортирована в среду разработки игрового движка Unity вместе с 3D-моделью робота. Результат совмещения видеосцены с моделью робота представлен на рис. 10.

Кроссплатформенность игрового движка Unity позволяет быстро переносить реализованное ПО для построения вида "от третьего лица" между различными платформами (Windows, Linux).

Разработанное ПО было протестировано на компьютере с процессором Core i3 5100 с графическим процессором Nvidia GeForce GT 730 под управлением ОС Windows 7. Среднее время обработки составляет 55 мс, что соответствует частоте 18 Гц. 3D-модель является интерактивной и позволяет отображать позиции звеньев манипулятора, расположенного на борту мобильного робота.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ существующих систем кругового обзора и построения панорамных изображений, который показал ряд недостатков имеющихся реализаций, таких как высокие требования к вычислительным ресурсам для систем со несколькими телекамерами, ограниченность поля зрения систем с зеркалами и систем кругового обзора для транспортных средств.

Рассмотрен вариант реализации системы кругового обзора для мобильного робототехнического комплекса на базе системы камер с перекрывающимися полями зрения с использованием fisheye-объективов.

Проведен анализ алгоритмов определения внутренних и внешних параметров телекамер. Для склейки изображений с учетом особенностей системы выбран алгоритм с использованием статических матриц гомографии. На основании анализа выбрана схема калибровки модуля кругового обзора с использованием

шаблона типа шахматной доски для определения внутренних параметров и дескрипторы, полученные с помощью детектора SIFT, для определения внешних параметров. Реализовано программное обеспечение для получения панорамного изображения.

Данная схема показала возможность построения панорамы в режиме реального времени на указанной конфигурации оборудования. Дальнейшая оптимизация и использование параллельных вычислений позволит сократить время обработки входных изображений.

Исследование методов проективной геометрии показало, что задача построения вида "от третьего лица" решена на уровне систем кругового обзора для транспортных средств. Предложен новый вариант поверхности для проектирования панорамного изображения при построении вида "от третьего лица". Использование игрового движка позволяет легко изменять 3D-модели мобильных роботов и делать их интерактивными для более эффективного управления мобильным роботом.

Список литературы

1. Kadous M. W., Sheh R. K.-M., Sammut C. Effective user interface design for rescue robotics // ACM Conference on Human-Robot Interaction. ACM Press, 2006. P. 250–257.
2. Song Y., Shi Q., Huang Q., Fukuda T. Development of an omnidirectional vision system for environment perception // 'ROBIO', IEEE. 2014. P. 695–700.
3. Shi Q., Li C., Wang C., Luo H., Huang Q., Fukuda T. Design and implementation of an omnidirectional vision system for robot perception // Mechatronics. 2017. Vol. 41. P. 58–66.
4. Sato T., Moro A., Sugahara A., Tasaki T., Yamashita A., Asama H. Spatiotemporal bird's-eye view images using multiple fisheye cameras // Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Kobe, 2013. P. 753–758.
5. Lim S., Jun S., Jung I.-K. Wraparound View Equipped on Mobile Robot // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering. 2012. Vol. 6, N. 3. P. 354–356.
6. Jung I.-K., Kim H., Jung W. S., Jeon S. A Remote Robot Control System based on AVM using Personal Smart Device // Recent Advances in Circuits, Communications and Signal Processing, 2013. P. 177–180.
7. **Официальный** сайт компании PointGrey. URL: www.ptgrey.com (дата обращения: 31.10.2017).

8. **Официальный** сайт компании GoPro. URL: gopro.com (дата обращения: 31.10.2017).
9. Yeh Y.-T., Peng C.-K., Chen K.-W., Chen Y.-S., Hung Y.-P. Driver Assistance System Providing an Intuitive Perspective View of Vehicle Surrounding // ACCV 2014 Workshops, Part II. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2014. Vol. 9009. P. 403–417.
10. **Официальный** сайт компании Nissan. URL: www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/avm.html (дата обращения: 31.10.2017).
11. **Официальный** сайт компании Fujitsu. URL: www.fujitsu.com/us/products/devices/semiconductor/gdc/products/omni.html (дата обращения: 31.10.2017).
12. Gurrieri L. E., Dubois E. Acquisition of omnidirectional stereoscopic images and videos of dynamic scenes: a review // Journal of Electronic Imaging. 2013. Vol. 22, N. 3. P. 1–21.
13. Schreer O., Kauff P., Eisert P., Weissig C., Rosenthal J.-C. Geometrical Design Concept for Panoramic 3D Video Acquisition // Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2012. P. 2757–2761.
14. Aliakbarpour H., Tahri O., Araújo H. Visual servoing of mobile robots using non-central catadioptric cameras // Robotics and Autonomous Systems. 2014. Vol. 62, N. 11. P. 1613–1622.
15. Lin H.-Y., Wang M.-L. HOPIS: Hybrid Omnidirectional and Perspective Imaging System for Mobile Robots // Sensors. 2014. Vol. 14, N. 9. P. 16508–16531.
16. Лазаренко В. П., Джамийков Т. С., Коротаев В. В., Ярышев С. Н. Метод создания сферических панорам из изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 1. С. 46–53.
17. Lazarenko V., Korotaev V., Yaryshev S. The algorithm for transformation of images from omnidirectional cameras // Proc. Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP), Mexico. 2014.
18. Utsugi K., Moriya T. A Camera Revolver for Improved Image Stitching // Ma-chine Vision Applications (MVA). 2002. P. 261–264.
19. Brown M., Lowe D. G. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features // Int. J. Comput. Vision. 2007. Vol. 74, N. 1. P. 59–73.
20. Sakharkar V. S., Gupta S. R. Image stitching Techniques—an overview // International Journal of Computer Science and Applications. 2013. vol. 6, no. 2. P. 324–330.
21. Samsung NX Series. Руководство по продуктам. URL: http://www.samsung.com/ru/pdf/NX_Lens_Guide_120606.pdf. (дата обращения: 28.11.2017).
22. Mei C., Rives P. Single View Point Omnidirectional Camera Calibration from Planar Grids // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2007. P. 3945–3950.
23. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2006. P. 5695–5701.
24. Zuliani M. RANSAC for Dummies // Vision Research Lab. 2014. P.1-101. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.1243&rep=rep1&type=pdf> (accessed 18.12.2018).
25. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial // FNT in Computer Graphics and Vision. 2006. Vol. 2, N. 1. P. 1–104.
26. Kashyap V., Agrawal P., Akhbari F. Real-time, Quasi Immersive, High Definition Automotive 3D Surround View System // Int'l Conf. IP, Comp. Vision, and Pattern Recognition. 2017. P. 10–16.

Real-Time Surround-View System for Mobile Robotic System

V. V. Varlashin, v.varlashin@rtc.ru, M. A. Ershova, m.ershova@rtc.ru,
SPbPU, St. Petersburg, 195251, Russian Federation,
V. A. Bunyakov, bunyakov@rtc.ru, O. A. Shmakov, shmakov@rtc.ru,
RTC, St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to the problem of increasing the adequacy of perception of the environment by the mobile robot operator using remote control. A variant of a real-time surround-view system for mobile robot based on the multiple cameras with fisheye lenses and overlapping fields of view is proposed. A prototype of the circular view system has been developed. In this paper, the key features of the architecture and software of the surround-view system are considered. The algorithms for determining the internal parameters of cameras and distortion correction are researched. New models for describing the distortions of wide-angle and fisheye lens are used. Algorithms for finding the external parameters of cameras, as well as homography matrices using invariant descriptors, are implemented. Static homography matrices are used during stitching images into panorama. Various image-stitching techniques based on the overlapped images region blending are investigated and implemented. The methods of projective geometry and augmented reality were studied to obtain a perspective third-person view. A surface variant for projecting panorama of a surround view is proposed. For the implementation of the software selected cross-platform game engine "Unity". Directions for further research are identified.

Keywords: computer vision, surround-view system for mobile robot, image projection

Acknowledgements. This research is supported by the Ministry of Education and Science of Russia. State assignment at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Department of "Mechatronics and Robotics"), project № 9.4040.2017/4.6.

For citation:

Varlashin V. V., Ershova M. A., Bunyakov V. A., Shmakov O. A. Real-Time Surround-View System for Mobile Robotic System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 162–170.

DOI: 10.17587/mau.20.162-170

References

1. Kadous M. W., Sheh R. K.-M., Sammut C. Effective user interface design for rescue robotics, *ACM Conference on Human-Robot Interaction*, ACM Press, 2006, pp. 250–257.
2. Song Y., Shi Q., Huang Q., Fukuda T. Development of an omnidirectional vision system for environment perception, *ROBIO, IEEE*, 2014, pp. 695–700.
3. Shi Q., Li C., Wang C., Luo H., Huang Q., Fukuda T. Design and implementation of an omnidirectional vision system for robot perception, *Mechatronics*, 2017, vol. 41, pp. 58–66.
4. Sato T., Moro A., Sugahara A., Tasaki T., Yamashita A., Asama H. Spatio-temporal bird's-eye view images using multiple fisheye cameras, *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Kobe, 2013, pp. 753–758.
5. Lim S., Jun S., Jung I.-K. Wrap-around View Equipped on Mobile Robot, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 354–356.
6. Jung I.-K., Kim H., Jung W. S., Jeon S. A Remote Robot Control System based on AVM using Personal Smart Device, *Recent Advances in Circuits, Communications and Signal Processing*, 2013, pp. 177–180.
7. **Official'nyj sajt kompanii PointGrey** [Official web site of PointGrey], available at: www.ptgrey.com (accessed 31.10.2017).
8. **Official'nyj sajt kompanii GoPro** [Official web site of GoPro], available at: go-pro.com (accessed 31.10.2017).
9. Yeh Y.-T., Peng C.-K., Chen K.-W., Chen Y.-S., Hung Y.-P. Driver Assistance System Providing an Intuitive Perspective View of Vehicle Surrounding, *ACCV 2014 Workshops, Part II. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2014, vol. 9009, pp. 403–417.
10. **Official'nyj sajt kompanii Nissan** [Official web site of Nissan Motor Co], available at: www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/avm.html (accessed 31.10.2017).
11. **Official'nyj sajt kompanii Fujitsu** [Official web site of Fujitsu Limited], available at: www.fujitsu.com/us/products/devices/semi-conductor/gdc/products/omni.html (accessed 31.10.2017).
12. Gurrieri L. E., Dubois E. Acquisition of omnidirectional stereoscopic images and videos of dynamic scenes: a review, *Journal of Electronic Imaging*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 1–21.
13. Schreer O., Kauff P., Eisert P., Weissig C., Rosenthal J.-C. Geometrical Design Concept for Panoramic 3D Video Acquisition, *Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2012, pp. 2757–2761.
14. Aliakbarpour H., Tahri O., Araújo H. Visual servoing of mobile robots using non-central catadioptric cameras, *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, vol. 62, no. 11, pp. 1613–1622.
15. Lin H.-Y., Wang M.-L. HOPIS: Hybrid Omnidirectional and Perspective Imaging System for Mobile Robots, *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 9, pp. 16508–16531.
16. Lazarenko V. P., Dzhamijkov T. S., Korotaev V. V., Jaryshev S. N. Metod sozdaniâ sfericheskikh panoram iz izobrazhenij, poluchennykh vsena-pravlennymi optiko-ëlektronnyimi sistemami [Method for creation of spherical panoramas from images obtained by omnidirectional optoelectronic systems], *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 46–53 (in Russian).
17. Lazarenko V., Korotaev V., Yaryshev S. The algorithm for transformation of images from omnidirectional cameras, *Proc. Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP)*, Mexico, 2014.
18. Utsugi K., Moriya T. A Camera Revolver for Improved Image Stitching, *Machine Vision Applications (MVA)*, 2002, pp. 261–264.
19. Brown M., Lowe D. G. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features, *Int. J. Comput. Vision*, 2007, vol. 74, no. 1, pp. 59–73.
20. Sakharkar V. S., Gupta S. R. Image stitching Techniques—an overview, *International Journal of Computer Science and Applications*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 324–330.
21. Samsung NX Lens Guide, available at: http://www.samsung.com/ru/pdf/NX_Lens_Guide_120606.pdf (accessed 28.11.2017) (in Russian).
22. Mei C., Rives P. Single View Point Omnidirectional Camera Calibration from Planar Grids, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007, pp. 3945–3950.
23. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2006, pp. 5695–5701.
24. Zuliani M. RANSAC for Dummies, *Vision Research Lab*, 2014, pp. 1–101. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.475.1243&rep=rep1&type=pdf> (accessed 18.12.2018).
25. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial, *FNT in Computer Graphics and Vision*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 1–104.
26. Kashyap V., Agrawal P., Akhbari F. Real-time, Quasi Immersive, High Definition Automotive 3D Surround View System, *Int'l Conf. IP, Comp. Vision, and Pattern Recognition*, 2017, pp. 10–16.