

В. В. Варлашин, аспирант, инженер-исследователь, botanic-8@yandex.ru,

А. В. Лопота, д-р техн. наук, проф., alopota@rtc.ru,
ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Оптимизация параметров проецирования системы кругового обзора с использованием реперных меток*

Обсуждается проблема повышения качества воспроизведения окружающей среды системой кругового обзора мобильного робота, работающей в режиме дополненной реальности. Рассматривается вариант системы кругового обзора на базе системы телевизионных камер с перекрывающимися полями зрения. Разработана виртуальная модель, включающая в себя 3D-CAD модели мобильного робота и окружающих объектов, а также виртуальные модели телевизионных камер. Для реализации модели выбрана кроссплатформенная интегрированная среда разработки "Unity". Определены методы решения задачи отображения окружающего пространства в режиме построения вида "от третьего лица". Предложен математический критерий оценки качества воспроизведения окружающего пространства, основанный на сопоставлении точек, полученных с виртуальной модели, с точками, полученными в результате проецирования изображений с виртуальных телевизионных камер. Для получения точек использованы реперные метки типа ArUco, обеспечивающие однозначное сопоставление точек на исходном и синтезированном изображениях. Исследована зависимость значения целевой функции задачи оптимизации от параметров проецирования методом равномерного поиска. Предложен метод автоматической адаптации параметров проецирования при использовании сверхширокоугольных объективов в составе телевизионных камер и методов стереозрения. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: лазерный сенсор, 3D-дальнометрическое изображение, экстремальная навигация, задача многомерной оптимизации

Введение

Многокамерные системы технического зрения кругового обзора (СКрО), устанавливаемые на мобильные роботы (МР), являются одним из инструментов для повышения адекватности восприятия оператором окружающей среды [1–5]. Одним из наиболее распространенных вариантов отображения полученной с помощью СКрО информации является построение вида "от третьего лица" (англ. third-person view) путем совмещения виртуальной модели МР с изображениями с телевизионных камер (ТВ камер), объединяемых в панорамное изображение, которое в дальнейшем проецируется на внутреннюю часть поверхности типа "чаша" (англ. bowl).

Проработка вариантов размещения ТВ камер в составе СКрО для определения наилучшего варианта в зависимости от решаемых МР задач, а также математическое описание поверхности для проецирования изображений в режиме вида "от третьего лица" является актуальной задачей и требует применения виртуальных моделей, в рамках которых возможно

осуществлять варьирование параметров в широких диапазонах значений.

На современном этапе развития технологии построения вида "от третьего лица" нет математически обоснованного критерия качества воспроизведения сцены для выбора формы поверхности для проецирования изображений с ТВ камер СКрО, а также критерия выбора значений параметров проецирования.

Целью работы является выработка математически обоснованного критерия выбора формы поверхности для проецирования изображений с ТВ камер СКрО. Для достижения поставленной цели предлагается использование компьютерной модели МР с СКрО, учитывающей конструктивные особенности робота, размещение ТВ камер на его борту и их характеристики, для проведения виртуальных исследований.

С учетом выбранного способа проведения исследований для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить схему размещения ТВ камер СКрО;
- 2) определить варьируемые числовые параметры;
- 3) разработать виртуальную модель СКрО, включающую в себя модели МР, окружающей среды и ТВ камер;

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90094 "Исследование методов оценки расстояний до объектов окружающей среды с использованием системы кругового обзора мобильных роботов".

4) выбрать модель проецирования изображений с ТВ камер для получения вида "от третьего лица";

5) разработать критерий оценки качества воспроизведения сцены;

6) исследовать влияние параметров проецирования изображений с ТВ камер на качество воспроизведения сцены;

7) разработать программное обеспечение для автоматизации процесса исследований.

Описание виртуальной модели системы кругового обзора

Рассматривается СКрО, реализуемая с использованием четырех ТВ камер с объективами, имеющими перекрывающиеся поля зрения. Конструктивно ТВ камеры могут быть как установлены в единый модуль, так и разнесены и установлены на корпусных элементах МР. В качестве типовой платформы, широко применяемой в робототехнике, выбрана платформа Turtlebot 3 Burger (далее Turtlebot) [6]. Виртуальная модель Turtlebot с установленной СКрО реализуется в интегрированной среде разработки (англ. IDE) Unity [7]. Используемые в IDE Unity единицы измерения являются безразмерными, поэтому в рамках исследования принято использовать следующий масштаб: одна единица измерения длины в IDE Unity равняется одному метру.

Выбор среды для моделирования осуществлен с учетом аналитического обзора симуляторов роботов и симуляторов беспилотных автомобилей. Большинство современных симуляторов использует в своей основе игровые движки Unity или Unreal Engine [8], именно поэтому для разработки виртуальной модели для проведения экспериментов принято решение использовать непосредственно IDE Unity. Внешний вид МР в разработанной модели представлен на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Главным элементом модели являются виртуальные камеры, с помощью которых реализуется СКрО МР. В IDE Unity используется точечная модель камеры (англ. pin hole), с возможностью задания таких параметров, как модель проецирования, угол обзора камеры в градусах, фокусное расстояние, формат камеры, разрешение матрицы камеры, а также смещение оптической системы относительно матрицы камеры.

Одним из важных элементов, необходимых для моделирования камер, является возможность внесения искажений, имитирующих искажения оптической системы — дисторсии. Классическая модель дисторсий Brown—Conrady учитывает радиальные и тангенциальные искажения, описываемые полиномами n -го порядка. В IDE Unity дисторсия может симулироваться с помощью инструментов постобработки Postprocessing, однако стандартный инструмент позволяет вносить искажения, описываемые полиномом только второго порядка.

Описанные параметры моделей камер в целом соответствуют набору параметров, которыми описываются реальные камеры и их оптические системы (объективы). На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) представлен результат получения изображений с моделей камер. Видны искажения на изображениях с курсовой и кормовой камер (позиции 1 и 3 на рис. 2).

В самой среде Unity нет инструментов, позволяющих проводить обработку изображений, однако она позволяет использовать плагины, в том числе динамически подключаемые библиотеки (DLL). Обработка изображений с камер проводится с помощью DLL, написанной с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV [9].

Построение изображения в режиме дополненной реальности

Работа СКрО в режиме дополненной реальности требует изменения ракурса наблюдения сцены для получения вида "от третьего лица". Получение такого изображения включает в себя несколько типовых этапов:

1) внутренняя и внешняя калибровка для определения параметров оптических систем камер и их взаимного расположения;

2) деформация изображений для построения панорамного изображения с использованием цилиндрической или сферической проекции;

3) объединение деформированных изображений в панораму путем смешивания областей пересечения изображений с соседних камер;

4) проецирование панорамного изображения на внутреннюю часть поверхности типа "чаша" и совмещение с моделью МР.

Этапы 1—3 решаются известными методами с помощью библиотеки OpenCV и не представ-

ляют интереса в рамках исследования. Рассмотрим подробнее 4-й этап.

Качество воспроизведения видеосцены напрямую зависит от формы поверхности для проецирования. В ходе исследования рассматривались научно-исследовательские работы и прототипы СКРО, применяемые как в робототехнике, так и в транспортных средствах. По форме поверхности их можно классифицировать на два типа:

1) параболоиды вращения различных порядков;

2) комбинированные, в которых применяются несколько типов поверхностей.

В общем случае параболоиды вращения такого типа описываются уравнением

$$Z = \frac{x^{2n} + y^{2n}}{a^{2n}}, \quad (1)$$

где x, y, z — координаты точки в пространстве; a — коэффициент параболоида; $2n$ — степень параболоида вращения. Чаще всего используются параболоиды вращения второй [2] и четвертой [10] степеней.

Комбинированные поверхности обычно представлены стыковкой двух типов поверхностей. Это могут быть комбинации плоскости с цилиндрической или параболической поверхностью [11], описываемые уравнениями

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

где x, y, z — координаты точки в пространстве, d — радиус цилиндра,

либо комбинации параболоида вращения и цилиндра [11]:

$$\begin{cases} z = \frac{x^4 + y^4}{a^4}, x^4 + y^4 < c^4; \\ z \geq \frac{x^4 + y^4}{a^4}, x^4 + y^4 = c^4, \end{cases} \quad (3)$$

где x, y, z — координаты точки в пространстве; a — коэффициент параболоида; c — константа, задающая расстояние, на котором параболоид вращения переходит в цилиндрическую поверхность.

Возможна комбинация плоскости со сферической поверхностью [12, 13]. Плоская часть поверхности описывается уравнениями в полярной системе координат

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2}; \\ \theta = \left[\arctg\left(\frac{y}{x}\right) \right]^{-1}, \end{cases} \quad (4)$$

а сферическая — уравнением

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2, \quad (5)$$

где $x = x_0 + r \sin \psi \cos \varphi$;

$y = y_0 + r \sin \psi \sin \varphi$;

$z = z_0 + r \cos \psi$;

$0 \leq \psi \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Сравнение результатов проецирования изображений с использованием различных форм поверхностей приводится в работе [11], при этом сравнение осуществляется на качественном уровне и отражает субъективное мнение авторов. Помимо этого важной является оценка влияния самих параметров применяемой формы поверхности для проецирования изображений на качество воспроизведения сцены в режиме дополненной реальности.

Методика оценки качества воспроизведения сцены

Для получения наилучшего результата воспроизведения сцены необходимо использование количественных критериев оценки качества воспроизведения сцены. В качестве такого критерия может выступать среднеквадратическая ошибка модели (англ. Mean Square Error, MSE), вычисляемая для положения точек (пикселей), полученных на изображении в режиме дополненной реальности, и положения тех же точек, но полученных с использованием "эталонного" изображения. Под "эталонным" изображением будем понимать изображение, получаемое с использованием виртуальной модели с помощью камеры, расположенной над роботом (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Расположение и ориентация камеры над моделью робота, совмещенной с "чашей", полностью соответствует расположению и ориентации камеры, обеспечивающей получение "эталонного" изображения. Проведение физического эксперимента с аналогичным расположением элементов является затруднительным ввиду трудности расположения дополнительной камеры над реальным роботом для получения "эталонного" изображения, поэтому применение виртуальной модели для проведения экспериментов является полностью обоснованным.

Для набора однозначно сопоставляемых точек на "эталонном" изображении и на изображении, полученном в режиме дополненной реальности, применим выражение для определения MSE:

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2)}{n}, \quad (6)$$

где $\hat{x}_i, \hat{y}_i$ — координата i -й точки на эталонном изображении; x_i, y_i — координата i -й точки на синтезированном изображении; n — число сопоставляемых точек.

Используя значение среднеквадратичной ошибки в качестве целевой функции, можно решать задачу поиска оптимальных параметров:

$$f(x) \rightarrow \min_{x \in X}, \quad (7)$$

где x — вектор оптимизируемых параметров.

Разные варианты поверхностей для проецирования требуют разных набор параметров и уравнений, которыми они описываются, а также различные варианты накладываемых ограничений на векторы оптимизируемых параметров. Ранее в работе [14] коллективом авторов рассматривался вариант построения поверхности для проецирования, описываемой уравнениями в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} z &= 0, 0 < r \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi; \\ z &= \sin\left(\frac{\pi(r-R)}{2R}\right), R < r \leq 2R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \end{aligned} \quad (8)$$

где R — радиус скругления поверхности.

Для дальнейших исследований используется именно эта форма поверхности, так как она зависит только от одной переменной, и решается задача поиска оптимального значения одного параметра.

Методика сопоставления точек

Определение точек, по которым будет осуществляться оптимизация параметров проецирования, является важной задачей. В качестве ориентиров могут выступать как специальные реперные метки (маркеры), так и ключевые (особые) точки, получаемые путем применения различных детекторов типа SIFT (The scale-invariant feature transform) [15], SURF (Speeded Up Robust Features) [16], ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [17] и другие.

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Так, методы, основанные на выделении особых точек, позволяют получить гораздо большее число точек для сопоставления изображений, при этом существующие подходы к описанию точек — дескрипторы — являются устойчивыми как к повороту и переносу, так и к перспективным искажениям, однако не дают представления о расстоянии до объектов, что может быть критичным при выполнении исследований. Поэтому для решения задачи сопоставления точек предлагается использовать реперные метки. В качестве таких меток будем использовать ArUco-маркеры [18], относящиеся к фидуциальным маркерам. Такой тип маркеров сохраняет работоспособность при возникновении окклюзий, а наличие словаря с известными маркерами позволяет в дальнейшем безошибочно сопоставлять точки маркеров на изображениях.

Для проведения экспериментов реперы располагаются на виртуальной сцене так, чтобы они попадали в поле зрения камер СКРО, поле зрения камеры, формирующей "эталонное" изображение, и были видны на синтезированном изображении (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Экспериментальные исследования

С использованием встроенных в OpenCV методов обнаружения ArUco-маркеров определяются геометрические центры маркеров и позиции углов маркеров в системе координат изображений, расстояние до маркера (при известных параметрах калибровки камеры и размерах маркеров), а также углы поворота относительно камеры. Число маркеров для исследований может быть любым, для проведения эксперимента были выбраны шесть маркеров, расположенных перед роботом на расстоянии одного метра от МР.

Задача поиска оптимального значения параметра R используемой модели решается методом перебора (равномерного поиска). Для этого необходимо определить ограничения, накладываемые на изменяемые параметры. В таблице приведены накладываемые ограничения для рассмотренных форм поверхностей.

Исходя из этого поиск оптимального значения осуществлялся в диапазоне изменения R от 0,1 до 3 м с шагом 0,1. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлены изменения

Уравнение поверхности	Накладываемые ограничения	
(1)	$z \in [0, +\infty]$ $a \in [0, +\infty]$	Ограничения на x и y накладывать нет необходимости, так как они в явном виде зависят от z
(2)	$z \in [0, +\infty]$ $d \in [0, +\infty]$	Ограничения на x и y накладывать нет необходимости, так как они в явном виде зависят от d
(3)	$r \in [0, +\infty]$ $c \in [0, +\infty]$ $a \in [0, +\infty]$	Ограничения на x и y накладывать нет необходимости, так как они в явном виде зависят от c
(4), (5)	$r \in [0, +\infty]$ $R \in [0, +\infty]$ $\varphi \in [0, +\infty]$	Ограничения на x и y накладываются в явном виде через уравнения
(8)	$R \in [0, +\infty]$	Ограничения на r и φ накладываются в явном виде через уравнения

изображений в процессе моделирования для значений 1, 2, и 3 м. При уменьшении параметра R до значений, меньших 0,5 м, а также при увеличении параметра до значений, больших 2,5 м, искажения становятся слишком большими (на рис. 5 видно, что верхние реперные метки пропадают на синтезированном изображении при $R = 3$ м). На рис. 6 представлен график зависимости значений MSE от значений параметра R .

Рассмотренные результаты получены для одного варианта угла наблюдения МР в режиме дополненной реальности и одного варианта размещения реперных меток, тогда как в реальности расположение объектов относительно робота существенно влияет на качество синтезированного вида "от третьего лица". Решение задачи автоматической настройки параметров

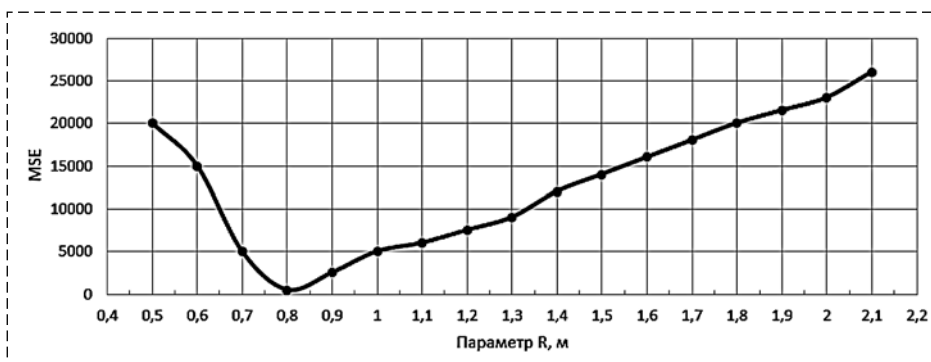


Рис. 6. Зависимость MSE от значений параметра R

Fig. 6. Dependence of MSE on R parameter values

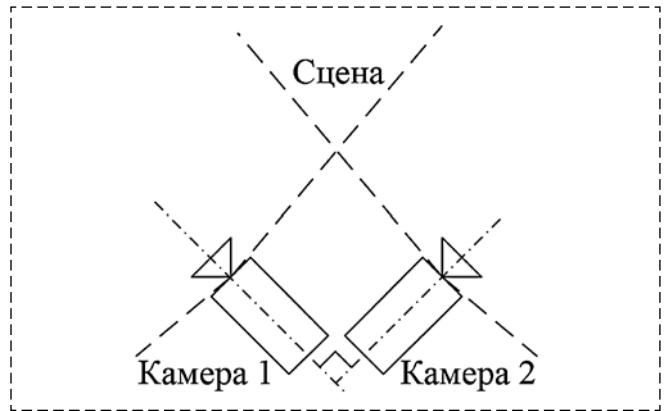


Рис. 7. Схема расположения камер и их полей зрения при использовании сверхширокоугольных объективов

Fig. 7. Layout of cameras and their fields of view when using fisheye lenses

в зависимости от условий окружающей среды может осуществляться в два этапа. На первом этапе СКрО оптимизируется для некоторых типовых расстояний до объектов окружающей среды описанными методом. На втором этапе система принимает решение о выборе необходимых параметров исходя из реальных расстояний до объектов.

Для решения этой задачи возможно использование стереопар, образуемых изображениями с соседних камер СКрО. Использование сверхширокоугольных объективов типа "fisheye" с углами обзора порядка 180° позволяет получить достаточно большую область пересечения изображений с соседних камер для определения расстояний до объектов сцены методами стереозрения (рис. 7).

Заключение

В работе проведен обзор существующих форм поверхностей для проецирования изображений с камер СКрО для получения вида "от третьего лица" в процессе работы СКрО в режиме дополненной реальности. Обзор показал, что определение наиболее оптимальной формы поверхности является актуальной задачей, не имеющей математически обоснованного количественного критерия выбора формы поверхности.

В качестве такого критерия предложено использовать среднеквадратическую ошибку модели (MSE), вычисляемую для положения точек (пикселей), полученных на изображении в режиме дополненной реальности, и положения тех же точек, но полученных с использованием "эталонного" изображения. Выбор точек для сопоставления напрямую влияет на значение MSE, поэтому для получения набора однозначно сопоставляемых точек предложено использовать реперные метки типа ArUco-маркеры.

Проведение экспериментов с реальным МР является затруднительным ввиду трудностей в получении "эталонных" изображений. Поэтому для решения задачи оптимизации разработана виртуальная модель СКрО, установленной на МР Turtlebot. Виртуальная модель разработана с использованием IDE Unity и библиотеки OpenCV.

Исследование работы СКрО в режиме дополненной реальности осуществляется на примере оптимизации параметров одного варианта поверхности для проецирования панорамных изображений. В ходе эксперимента показано, что предложенный метод позволяет определить оптимальное значение параметра, поэтому можно сделать вывод о возможности применения метода и для других форм поверхностей.

Недостатком предложенного метода является определение оптимальных параметров только для одного варианта расположения реперных меток, выступающих в роли объектов сцены. Для получения качественного изображения в режиме дополненной реальности необходимо иметь набор параметров для различных вариантов расстояний до объектов окружающей среды, а также способ измерения этих расстояний. В качестве возможного решения предлагается использовать стереопары, образуемые изображениями с соседних камер СКрО.

Разработанная виртуальная модель позволяет варьировать внутренние и внешние параметры СКрО в широком диапазоне значений. Дальнейшие исследования будут направлены на сравнение результатов оптимизации параметров альтернативных поверхностей для проецирования изображений и сравнение результатов с уже рассмотренной моделью для выбора наилучшего варианта.

1. 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.
2. 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.
3. Lim S., Jun S., Jung I. Wrap-around View Equipped on Mobile Robot. // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2012. Vol. 6. P. 354–356.
4. Yang Z., Zhao Y., Hu X., Yin Y., Zhou L., Tao D. A flexible vehicle surround view camera system by central-around coordinate mapping model // *Multimedia Tools and Applications*. 2018. Vol. 78. P. 11983–12006.
5. Gao Y., Lin C., Zhao Y., Wang X., Wei S., Huang Q. 3-D Surround View for Advanced Driver Assistance Systems // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 19. P. 320–328.
6. Официальный сайт компании Open Source Robotics Foundation. URL: www.turtlebot.com/ (дата обращения: 01.10.2021).
7. Официальный сайт компании Unity Technologies. URL: www.unity.com/ (дата обращения: 01.10.2021).
8. Официальный сайт компании Epic Games. URL: www.unrealengine.com/ (дата обращения: 01.10.2021).
9. Официальный сайт сообщества OpenCV team. URL: www.opencv.org/ (дата обращения: 01.10.2021).
10. Kuo T. Y., Wang Y. S., Cheng Y. J., Wan K. H. 3D Around View Monitoring System for automobiles // *ICCE, IEEE*. 2017. P. 271–272.
11. 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 Workshops, Springer*. 2014. P. 403–417.
12. Sung K., Lee J., An J. Chang E. Development of Image Synthesis Algorithm with Multi-Camera // *VTC Spring, IEEE*. 2012. P. 1–5.
13. Auysakul J., Xu H., Zhao W. Development of Hemi-Cylinder Plane for Panorama View in Around View Monitor Applications // *2016 International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA)*. 2016. P. 26–30.
14. Варлашин В. В., Ершова М. А., Буняков В. А., Шмаков О. А. Система кругового обзора реального времени для мобильных робототехнических комплексов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019. Т. 20, № 3. С. 162–170.
15. Lowe D. G. Object recognition from local scale-invariant features // *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. 1999. Vol. 2. P. 1150–1157.
16. Bay H., Tuytelaars Y., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features // *Computer Vision-ECCV*. 2006. Vol. 3951. P. 404–417.
17. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. R. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // *2011 International Conference on Computer Vision*. 2011. P. 2564–2571.
18. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marín-Jiménez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47. P. 2280–2292.

Optimization of Surround-View System Projection Parameters using Fiducial Markers

V. V. Varlashin, botanic-8@yandex.ru, A. V. Lopota, alopota@rtc.ru,

Peter the Grate St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: **Varlashin V. V.**, Graduate Student of the Department of Mechatronics and Robotics, Research Engineer of the SPbPU, SPbPU, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: botanic-8@yandex.ru

Accepted on November 3, 2021

Abstract

The paper is devoted to the problem of increasing quality of reproduction of the environment by mobile robot's surround-view system, operating in the augmented reality mode. A variant of a surround-view system based on the cameras with over-lapping fields of view is being considered. A virtual model has been developed, it includes 3D-CAD models of a mobile robot and surrounding objects, as well as virtual models of cameras. The cross-platform integrated development environment "Unity" was chosen to implement the model. Methods for solving the problem of displaying the surrounding mobile robot space in the "third-person view" mode are determined. A mathematical criterion for assessing the quality of reproduction of the surrounding space is proposed. It is based on the comparison of points obtained from a virtual model with points obtained as a result of projection of images from virtual cameras. To obtain points, ArUco fiducial markers were used, providing an unambiguous comparison of points on the original and synthesized images. The dependence of the value of the objective function of the optimization problem on the projection parameters by the uniform search method are investigated. A method for automatic adaptation of projection parameters using fisheye lenses and stereo vision methods is proposed. Directions for further research are identified.

Keywords: computer vision, surround-view system, augmented reality, virtual model

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90094 "Study of methods for estimating distances to environmental objects using a surround-view system of mobile robots".

For citation:

Varlashin V. V., Lopota A. V. Optimization of Surround-View System Projection Parameters using Fiducial Markers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 97–103.

DOI: 10.17587/mau.23.97-103

References

1. 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.
2. 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.
3. Lim S., Jun S., Jung I. Wrap-around View Equipped on Mobile Robot, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, pp. 354–356.
4. Yang Z., Zhao Y., Hu X., Yin Y., Zhou L., Tao D. A flexible vehicle surround view camera system by central-around coordinate mapping model, *Multimedia Tools and Applications*, 2018, vol. 78, pp. 11983–12006.
5. Gao Y., Lin C., Zhao Y., Wang X., Wei S., Huang Q. 3-D Surround View for Advanced Driver Assistance Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, pp. 320–328.
6. Official web site of Open Source Robotics Foundation, available at: www.turtlebot.com/ (accessed 01.10.2021).
7. Official web site of Unity Technologies, available at: www.unity.com/ (accessed 01.10.2021).
8. Official web site Epic Games, available at: www.unrealengine.com/ (accessed 01.10.2021).
9. Official web site of OpenCV team community, available at: www.opencv.org/ (accessed 01.10.2021).
10. Kuo T. Y., Wang Y. S., Cheng Y. J., Wan K. H. 3D Around View Monitoring System for automobiles, *ICCE, IEEE*, 2017, pp. 271–272.
11. 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 Workshops*, Springer, 2014, pp. 403–417.
12. Sung K., Lee J., An J. Chang E. Development of Image Synthesis Algorithm with Multi-Camera, *VTC Spring, IEEE*, 2012, pp. 1–5.
13. Auysakul J., Xu H., Zhao W. Development of Hemi-Cylinder Plane for Panorama View in Around View Monitor Applications, *2016 International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCI)*, 2016, pp. 26–30.
14. Varlashin V. V., Ershova M. A., Bunyakov V. A., Shmakov O. U. Real-Time Surround-View System for Mobile Robotic System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20(3), pp. 162–170 (in Russian).
15. Lowe D. G. Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, vol. 2, pp. 1150–1157.
16. Bay H., Tuytelaars Y., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features, *Computer Vision-ECCV*, 2006, vol. 3951, pp. 404–417.
17. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. R. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *2011 International Conference on Computer Vision*, 2011, pp. 2564–2571.
18. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marín-Jiménez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, 2014, vol. 47, pp. 2280–2292.