

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932.2

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ОБЪЕКТОВ ПО СЕРИЯМ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫМ С РАЗНЫХ ТОЧЕК СЪЁМКИ КАМЕРОЙ С МАЛЫМ УГЛОМ ЗРЕНИЯ

© Косых В. П., Громилини Г. И., Яковенко Н. С.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kosych@iae.nsk.su*

Реконструкция трёхмерной структуры сцены и, в частности, определение расстояний до отдельных объектов по изображениям, полученным цифровыми камерами при разных ракурсах съёмки, применяются при решении различных прикладных задач. Определение ракурсов съёмки и параметров камер (калибровка системы регистрации) непосредственно по полученным снимкам — важный этап реконструкции, определяющий достоверность результатов. Малый угол зрения камер является одним из факторов, приводящих к значительным ошибкам калибровки и реконструкции. Рассматривается способ повышения точности калибровки за счёт расширения угла зрения посредством «сшивки» серии изображений, полученных из одной точки съёмки, в широкоугольную панораму, содержащую, кроме объектов интереса, другие точки съёмки. На примере оценивания расстояний до объектов реальной городской сцены показано, что предложенный способ обеспечивает точность, сопоставимую с точностью измерения расстояний по крупномасштабной карте местности.

Ключевые слова: измерение расстояний, камера с малым углом зрения, сопряжённые точки, триангуляция, калибровка камер, панорама.

DOI: 10.15372/AUT20240201

EDN: YCHTYA

Введение. Восстановление пространственной структуры сцены по её изображениям является одной из самых востребованных областей компьютерного зрения, имеющей обширную сферу практических применений (картография, робототехника, управление движущимися механизмами, хирургия). В качестве источников изображений обычно используются фото- и видеокамеры. Методы и математический аппарат этой области разрабатываются уже более 30 лет многими исследователями и достаточно детально изложены в ставших уже классическими работах [1, 2]. Согласно этим методам для восстановления структуры статической сцены в евклидовом пространстве необходимо наличие как минимум пары её изображений, полученных с разных точек съёмки, знание взаимного положения точек съёмки и ориентации собственных систем координат камер, а также их внутренних параметров, описывающих геометрию формирования изображений. При выполнении этих условий восстановление структуры сводится к поиску в изображениях сопряжённых точек (отображающих одни и те же точки сцены) и вычислению в трёхмерном пространстве координат точек схождения лучей, испущенных из оптических центров камер в направлении сопряжённых точек их фокальных плоскостей.

Общепринятый алгоритм определения в евклидовом пространстве трёхмерных координат объектов сцены по паре её снимков, сформированных камерами с известными внутренними параметрами, но неизвестными взаимным положением и ориентацией, состоит из следующих этапов:

— поиск на каждом из снимков с помощью одного из детекторов (например, [3–5]) набора особых точек, окрестности которых обладают характерными свойствами, позволяющими отличать их друг от друга и от общего фона;

— сопоставление наборов особых точек, принадлежащих разным снимкам, и формирование пар сопряжённых точек (feature matching [6, 7]);

— вычисление по набору сопряжённых точек так называемой фундаментальной матрицы, содержащей информацию о взаимном положении камер;

— вычисление вектора смещения и матрицы поворота системы координат одной камеры относительно другой на основе известных внутренних параметров и оценённой фундаментальной матрицы;

— поиск и измерение на каждом из снимков координат пар сопряжённых точек, являющихся изображениями представляющих интерес объектов сцены;

— триангуляция измеренных пар координат в трёхмерное пространство с учётом вычисленных параметров камер.

Пространственные положения объектов вычисляются в системе координат одной из камер с точностью до масштаба. Для того чтобы вычислить реальные расстояния между камерами и объектами, необходимо знать хотя бы одно расстояние между любыми двумя элементами сцены. Обычно масштаб определяется расстоянием между точками съёмки, поскольку они являются наиболее доступными для непосредственного измерения элементами.

Определение внутренних параметров (калибровка) камер представляет собой отдельную задачу. В исследовании [8] показано, что пары снимков, полученных с двух точек съёмки, в общем случае недостаточно для определения полного набора внутренних параметров. Поэтому для реконструкции трёхмерной структуры сцены в евклидовой метрике камеры должны быть откалиброваны предварительно либо необходимо обеспечить возможность получения дополнительных данных, достаточных для выполнения калибровки по результатам съёмки.

При реализации этого алгоритма как минимум два фактора оказывают значительное влияние на качество конечного результата. Во-первых, для получения надёжных оценок матрицы поворота и вектора смещения необходимо иметь представительный набор сопряжённых точек. На изображениях сцен со сложной структурой, существенно различающихся ракурсами съёмки, известные программные средства поиска и сопоставления особых точек [7, с. 418–494] часто формируют ложные пары, а ручной поиск и сопоставление требуют значительных временных затрат. Второй фактор, влияющий на оценки параметров взаимного ориентирования, — величина угла зрения камер. При малых углах зрения вычисление параметров взаимного положения камер оказывается неустойчивой процедурой, результат которой сильно зависит от комбинации сопряжённых точек.

В представленной работе рассматривается частная задача пространственной реконструкции — определение расстояний до отдельных объектов сцены по снимкам, полученным с разных точек съёмки камерой с малым углом зрения. Именно малый угол зрения осложняет применение стандартного алгоритма. Поэтому далее рассматривается другой подход к решению задачи, имитирующий геодезические измерения с помощью теодолита. Углы, многократно превышающие угол зрения камеры, предлагается измерять на совокупности панорам, которые построены из последовательностей кадров, снятых из этих точек.

Постановка задачи. На участке местности с множеством различных объектов (дома, деревья, заборы, автомобили и пр.), часть из которых недоступна, есть несколько позиций, с которых камерой с малым углом зрения можно сделать серию снимков, содержащих изображения этих объектов. Предполагается, что серия, полученная с каждой точки съёмки,

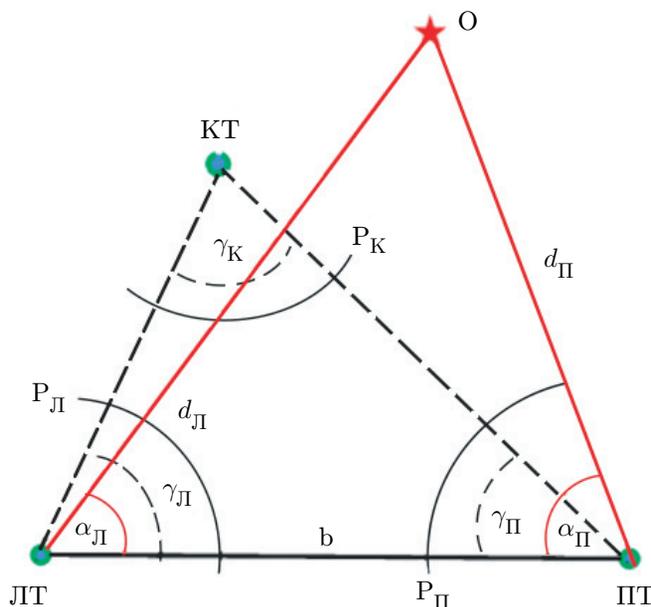


Рис. 1. Схема определения расстояний от левой и правой точек съёмки до объектов по панорамным изображениям сцены

полностью перекрывает область наблюдения, включающую в себя как объекты интереса, так и другую точку съёмки. Задача заключается в том, чтобы, измеряя положения объектов и точек съёмки на снимках, вычислить расстояния до объектов. Для её решения предлагается из каждой серии снимков построить панораму, по которой, выполнив необходимые угловые измерения, можно найти пространственное положение объектов. На рис. 1 представлена схема определения расстояний до объектов сцены по её панорамным изображениям.

На рисунке ЛТ и ПТ — левая и правая точки съёмки; b — базовая линия известной длины между левой и правой точками; О — объект сцены, до которого необходимо определить расстояния $d_Л$ и $d_П$; $\alpha_Л$ и $\alpha_П$ — углы между базовой линией и линиями визирования объекта из левой и правой точек. Символами $P_Л$, $P_П$ обозначены начала панорам, построенных по сериям изображений, полученным при съёмке с точек ЛТ и ПТ соответственно.

Так как любые три неколлинеарные точки в пространстве определяют плоскость, зная расстояние b между двумя точками съёмки (ЛТ и ПТ) и измерив по панорамам с левой и правой точек углы $\alpha_Л$ и $\alpha_П$, можно вычислить расстояния $d_Л$ и $d_П$ от точек съёмки до видимого на обеих панорамах объекта. Согласно теореме синусов для треугольника (ЛТ, О, ПТ) справедливо соотношение

$$\frac{d_Л}{\sin \alpha_П} = \frac{d_П}{\sin \alpha_Л} = \frac{b}{\sin [\pi - (\alpha_Л + \alpha_П)]},$$

откуда следует, что

$$d_Л = -b \frac{\sin \alpha_П}{\sin (\alpha_Л + \alpha_П)}, \quad d_П = -b \frac{\sin \alpha_Л}{\sin (\alpha_Л + \alpha_П)}. \quad (1)$$

В свою очередь, углы $\alpha_Л$ и $\alpha_П$ можно оценить непосредственно по панорамным снимкам, зная угловой размер пикселя в панорамном изображении. Так, для объекта O_k (k — номер

объекта) оценки углов имеют вид

$$\hat{\alpha}_Л = \frac{\sqrt{(x_{ПТ} - x_{Лk})^2 + (y_{ПТ} - y_{Лk})^2}}{w}, \quad \hat{\alpha}_П = \frac{\sqrt{(x_{Пк} - x_{ЛТ})^2 + (y_{Пк} - y_{ЛТ})^2}}{w}. \quad (2)$$

Здесь $(x_{ПТ}, y_{ПТ})$ и $(x_{Лk}, y_{Лk})$ — координаты правой точки съёмки и точки, соответствующей объекту O_k на левой панораме (см. рис. 1, вверху); $(x_{ЛТ}, y_{ЛТ})$ и $(x_{Пк}, y_{Пк})$ — координаты левой точки съёмки и соответствующей точки O_k на правой панораме; w — угловой размер пикселя панорамного изображения (считается, что шаг дискретизации вдоль направлений строк и столбцов одинаков, что для неспециализированных камер обычно выполняется).

Построение панорамы. В общем случае построение панорамы представляет собой достаточно сложный процесс, включающий в себя обнаружение особых точек на всех изображениях, поиск сопряжённых точек и определение соседних перекрывающихся изображений, оценку параметров взаимных геометрических преобразований и, наконец, «сшивку» изображений с учётом соседства и оценённых параметров преобразований [9]. Этот алгоритм, реализованный в классе *Stitcher* библиотеки с открытым кодом *OpenCV*, использован в данной работе для вычисления углов непосредственно по построенным панорамам. Однако в нашем случае задачу можно упростить, учитывая, что снимки для построения каждой из панорам делаются из одной точки съёмки последовательным поворотом камеры вправо с перекрытием примерно 30 % вдоль горизонтального направления. При этом вычислительно сложная и ресурсоёмкая процедура определения соседей может быть исключена, а каждый последующий кадр серии привязывается своим левым краем к правому краю предыдущего посредством поиска сопряжённых точек в текущей паре и определения геометрического преобразования правого кадра относительно левого. Поскольку съёмка выполняется вручную, возможны небольшие повороты камеры вокруг оптической оси и смещения поля зрения по вертикали, обусловленные как изменением рельефа сцены, так и ручным перемещением. Ввиду того, что угловые смещения в соседних кадрах невелики (в рассматриваемом случае порядка 10°), автоматический поиск в них сопряжённых точек не осложняется геометрическими искажениями, обусловленными изменением ракурса съёмки. По этой же причине координаты каждого следующего кадра в системе координат предыдущего, которые в общем случае связаны гомографией, можно аппроксимировать аффинным преобразованием

$$\mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{A}^{(k)} \mathbf{x}^{(k+1)}.$$

Здесь надстрочный индекс k — номер предыдущего кадра серии, $\mathbf{x} = (x, y, 1)^\top$ — вектор однородных координат, а матрица \mathbf{A} имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a & b & u \\ c & d & v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Более того, поскольку задача состоит не в восстановлении всей видимой структуры сцены, а в оценивании расстояний только до конкретных её объектов, нет необходимости строить полное панорамное изображение, достаточно определить только координаты этих объектов в единой, «панорамной» системе координат. Оценив все матрицы $\mathbf{A}^{(k)}$, можно привести все кадры последовательности к системе координат, например, первого кадра. Тогда интересующий объект, представленный в k -ом кадре вектором $\mathbf{x}^{(k)}$, в системе координат первого кадра будет представлен вектором

$$\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{A}^{(2)} \dots \mathbf{A}^{(k-1)} \mathbf{x}^{(k)}. \quad (3)$$

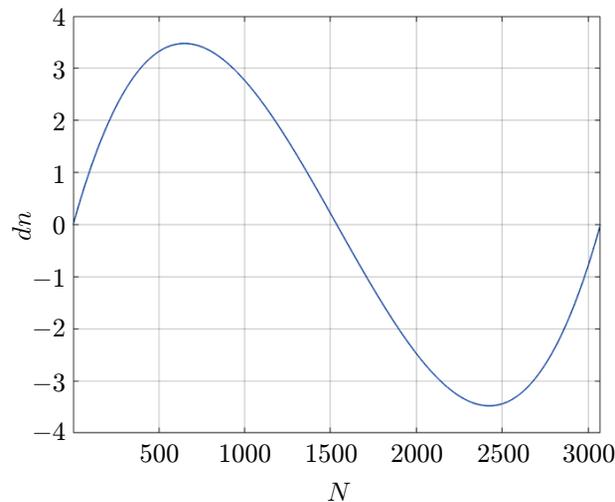


Рис. 2. Смещение столбцов изображения при проецировании на цилиндрическую поверхность

Это позволяет вычислять угловые расстояния между любыми объектами, зарегистрированными на разных кадрах серии, по приведённым выше формулам, измеряя координаты объектов непосредственно на исходных изображениях и приводя их в единую систему координат.

При вычислении угловых расстояний предполагается, что угловой размер пикселя одинаков для всех точек исходных изображений. В действительности при использовании камеры, которая соответствует модели центрального проецирования точек сцены на плоскость (камеры-обскуры), угловые размеры пикселя увеличиваются по мере его удаления от главной точки (точки пересечения оптической оси объектива с плоскостью изображения).

Более корректные оценки углов $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{п}}$ можно получить, если панорамы строить не по исходным снимкам, а по снимкам, спроецированным на цилиндрическую или сферическую поверхность с радиусом, равным фокусному расстоянию камеры. Например, можно показать, что при проецировании исходных изображений формата $N \times M$ пикселей для всех $1 \leq m \leq M$ с плоскости (x, y) на цилиндрическую поверхность (α, y) того же формата смещение n -го пикселя исходного изображения относительно n -го ($1 \leq n \leq N$) пикселя преобразованного составляет величину

$$dn = \left(\frac{N-1}{2 \operatorname{tg}(W/2)} \right) \operatorname{tg} \left(\left(\frac{W}{N-1} \right) \left(n - \frac{N+1}{2} \right) \right) + \frac{N+1}{2},$$

где W — горизонтальный угол зрения камеры. График dn для $W = 15^\circ$ и $N = 3072$ приведён на рис. 2.

Как следует из рис. 2, при «сшивке» в панораму серии исходных изображений посредством совмещения правого края предыдущего изображения с левым краем следующего будет копиться систематическая ошибка, обусловленная тем, что смещение столбцов справа и слева имеет разные знаки. При построении панорамы из изображений, спроецированных на цилиндрическую поверхность, эта ошибка устраняется.

При таком проецировании появляются смещения пикселей и в вертикальном направлении, зависящие от их положения относительно центра кадра, но поскольку при съёмке

на равнинной местности общее вертикальное смещение кадров в панораме невелико, влиянием этого смещения на оценки углов можно пренебречь.

Калибровка камеры. В прикладных задачах с применением методов реконструкции пространственной структуры сцены по паре разноракурсных изображений предполагается, что камера (пара камер) откалибрована, и внутренние параметры известны. Наиболее известный метод калибровки, реализованный в различных средах программирования (C++, MATLAB, Python), для оценки внутренних параметров камеры использует тестовый объект в виде изображения плоской шахматной доски с неравным количеством горизонтальных и вертикальных клеток заданного размера [10]. К сожалению, устойчивость оценок, полученных этим методом, вполне приемлемая при угле зрения $>30^\circ$, ухудшается с его уменьшением и при малых углах зрения не обеспечивает точности, необходимой для последующего вычисления взаимной ориентации пары разнесённых камер.

В то же время для вычисления углов α_L и α_P по панорамным координатам точек, представляющих точки съёмки и объект интереса, как следует из рис. 2, необходимо знать только угловой размер пикселя на панорамах. Вычислить его можно, если из серии изображений, снятых с контрольной точки (КТ) (см. рис. 1), построить дополнительную панораму P_K , содержащую изображения как левой, так и правой точек съёмки. На рис. 1 КТ — точка контрольной съёмки, γ_L и γ_P — углы между базовой линией и линиями визирования контрольной точки из левой и правой точек, γ_K — угол между линиями визирования левой и правой точек из контрольной точки. Символ P_K стоит в начале панорамы. Углы γ_L , γ_P и γ_K в пикселях вычисляются по формулам, аналогичным (2), а поскольку в угловой мере сумма этих углов равна π , то угловой размер пикселя вычисляется как

$$w = \frac{\pi}{\gamma_L + \gamma_P + \gamma_K}.$$

Практическая реализация. На рис. 3 приведён фрагмент космического снимка участка местности с городской застройкой, который привязан к карте местности и получен с помощью приложения Google Earth Pro [11].



Рис. 3. Снимок участка местности, на котором выполнялись измерения

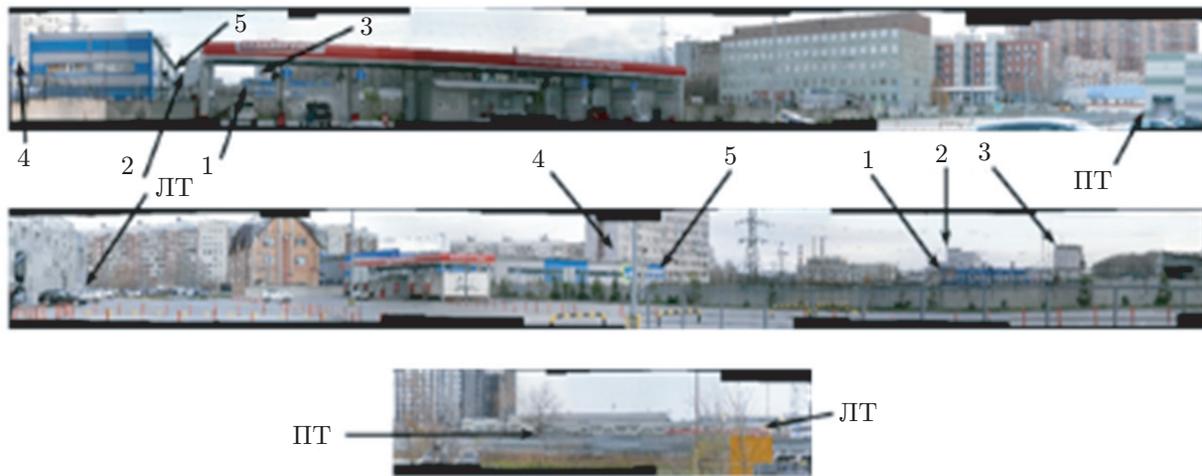


Рис. 4. Панорамы, содержащие объекты и точки съёмки

На снимке белыми точками с номерами помечены объекты, до которых необходимо измерить расстояния от точек съёмки ЛТ и ПТ. Из этих точек получены последовательности снимков, смещённых с перекрытием вдоль горизонтального направления, каждая из которых включает в себя все подлежащие измерению объекты и противоположную точку съёмки. На рис. 4 приведены панорамы, построенные с применением инструмента *Stitcher* библиотеки *OpenCV* из последовательностей исходных снимков. Верхняя панорама построена из последовательности, полученной с левой точки съёмки (P_L), а средняя — с правой (P_P). Внизу на рис. 4 помещена панорама, построенная из последовательности, полученной с контрольной точки (P_K). Объекты интереса и точки съёмки указаны стрелками. Левая панорама построена из 11 кадров, правая — из 14, контрольная — из 4. Формат кадров — 3072×1728 пикселей. Панорамы из снимков, спроецированных на цилиндрическую поверхность, не показаны, поскольку зрительно они практически не отличаются от приведённых.

В табл. 1 даны используемые в формулах (2) пары координат $(x_{ПТ}, y_{ПТ})$, $(x_{Лк}, y_{Лк})$ и $(x_{ЛТ}, y_{ЛТ})$, $(x_{Пк}, y_{Пк})$, $k = \overline{1, 5}$, измеренные вручную на левой, правой и контрольной панорамах, которые построены из исходных снимков. В колонках ЛТ и ПТ указаны координаты левой и правой точек съёмки, в колонках O_1 – O_5 — координаты объектов. Строки «Левая» и «Правая» относятся к левой и правой панорамам соответственно, строка «Контроль» — к контрольной. Символом «К» помечены координаты, вычисленные согласно выражению (3) непосредственно по исходным снимкам, приведённым в панорамную систему координат. Следует отметить, что в данном эксперименте контрольной точкой съёмки служит объект O_1 , но исключительно потому, что он оказался удобным местом, из которого можно было получить последовательность снимков для панорамы, содержащей и левую, и правую точки съёмки. На самом деле, калибровка могла быть выполнена совсем на других точках съёмки и на другом участке местности.

Как следует из табл. 1, координаты характерных точек, принадлежащих одним и тем же объектам, не совпадают при их измерении на панорамах и вычислении по снимкам, приведённым в панорамную систему координат. Аналогично различаются координаты точек, вычисленные по исходным кадрам и по кадрам, спроецированным на цилиндрическую поверхность. Однако за счёт того, что для каждого способа измерений калибровка выполняется по результатам именно этих измерений, оценки расстояний оказываются достаточно стабильными. В табл. 2 приведены расстояния, измеренные независимо по картам, полученным с помощью приложений *Google Earth Pro* и 2ГИС [12], а также вычисленные согласно выражениям (1). Здесь в именах колонок символами «Л» и «П»

Таблица 1

Координаты объектов и точек съёмки на панорамах

Панорама		ЛТ	ПТ	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅
Левая	<i>x</i>	–	19848	4158	3056	4371	196	2919
	<i>y</i>	–	1672	1192	991	1070	894	1058
Правая	<i>x</i>	1405	–	16784	16902	18825	10975	11809
	<i>y</i>	1116	–	1008	884	909	785	1052
Контроль	<i>x</i>	7279	2811	–	–	–	–	–
	<i>y</i>	1101	1144	–	–	–	–	–
Левая К	<i>x</i>	–	19896	4140	3040	4350	188	2307
	<i>y</i>	–	711	1164	979	1038	736	1077
Правая К	<i>x</i>	1416	–	16797	16904	18822	10976	11823
	<i>y</i>	991	–	248	–113	–10	367	590
Контроль К	<i>x</i>	7334	2833	–	–	–	–	–
	<i>y</i>	878	1186	–	–	–	–	–

Таблица 2

Расстояния от точек съёмки до объектов

Источник	Л–П	O ₁ –Л	O ₁ –П	O ₂ –Л	O ₂ –П	O ₃ –Л	O ₃ –П	O ₄ –Л	O ₄ –П	O ₅ –Л	O ₅ –П
Google Earth	103	262	264	355	360	444	437	146	190	124	154
2ГИС	103	265	264	360	366	448	439	145	191	122	152
Панорама		264	265	359	366	451	443	147	193	124	155
Панорама Ц		258	260	350	355	453	445	147	194	125	156
По кадрам		261	263	353	359	440	431	145	191	123	155
По кадрам Ц		261	263	353	359	440	431	145	191	123	155
<i>err</i> _{оценка} , %		2,6	1,5	2,8	3,0	2,0	1,8	1,4	2,1	2,4	2,6
<i>err</i> _{карта} , %		1,1	0	1,4	1,6	0,9	0,4	0,7	0,5	1,6	1,3

обозначены левая и правая точки съёмки, а O₁–O₅ — объекты. В первых двух строках даны расстояния, измеренные по картам, в строке «Панорама» — оценённые по данным измерений на панорамах из исходных кадров, а в строке «По кадрам» — на снимках, приведённых к панорамной системе координат согласно выражению (3). Строки «Панорама Ц» и «По кадрам Ц» содержат результаты аналогичных вычислений, полученные после проецирования исходных снимков на цилиндрическую поверхность. В предпоследней строке табл. 2 приведены значения относительной ошибки оценивания, вычисленной как

$$err_{\text{оценка}} = \frac{2 \max |d_{\text{карта}} - d_{\text{оценка}}|}{d_{\text{Google Earth}} + d_{\text{2ГИС}}} 100\%.$$

Здесь $d_{\text{карта}}$ и $d_{\text{оценка}}$ — значения расстояний, измеренных по карте и вычисленных по снимкам, выбранные так, чтобы модуль их разности был максимальным. В последней строке представлена относительная ошибка, полученная при измерениях по двум разным цифровым картам одного масштаба — 2ГИС и Google Earth:

$$err_{\text{карта}} = \frac{2|d_{\text{Google Earth}} - d_{\text{2ГИС}}|}{d_{\text{Google Earth}} + d_{\text{2ГИС}}} 100\%.$$

Как следует из табл. 2, относительные ошибки оценок расстояний, полученных по сериям снимков, по порядку величины совпадают с ошибками непосредственных измерений

по карте и не превышают 3 %, что для многих практических задач может быть вполне приемлемым значением.

Заключение. В работе исследован способ применения некалиброванной камеры с малым углом зрения для определения расстояний до объектов посредством имитации триангуляционных измерений, обычно выполняемых с помощью теодолита. Непосредственные измерения углов между направлениями на объекты и реперные точки заменяются на вычисление углов по последовательностям перекрывающихся снимков, полученных с двух разных точек съёмки. Калибровка камеры выполняется по последовательностям, снятым из трёх разных точек таким образом, чтобы в каждой последовательности присутствовали снимки с изображениями двух других точек съёмки. На примере реального участка местности показано, что ошибки измерения предложенным способом расстояний в несколько сотен метров лежат в пределах 3 %.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 121022000116-0).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Faugeras O.** Three-dimensional Computer Vision: A geometric ViewPoint. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1999. 663 p.
2. **Hartley R., Zisserman A.** Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. N.-Y.: Cambridge University Press, 2003. 655 p.
3. **Lowe D.** Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Int. Journ. Comp. Vis. 2004. **60**, N 2. P. 91–110.
4. **Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L.** SURF: Speeded Up Robust Features // Proc. of the Eur. Conf. Computer Vision (ECCV 2006). Pt. 1. Graz, Austria, 7–13 May, 2006. Vol. 3951. P. 404–417. DOI: 10.1007/11744023_32.
5. **Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P.** BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features // Proc. of the Eur. Conf. Computer Vision (ECCV 2010). Pt. 4. Crete, Greece, 5–11 Sept., 2010. Vol. 6314. P. 778–792. DOI: 10.1007/978-3-642-15561-1_56.
6. **Muja M., Lowe D. G.** Fast matching of binary features // Proc. of the 9th Conf. Computer and Robot Vision. Toronto, Canada, 28–30 May, 2012. P. 404–410. DOI: 10.1109/CRV.2012.60.
7. **Кэллер А., Брэдски Г.** Изучаем OpenCV 3. Разработка программ компьютерного зрения на C++ с применением библиотеки OpenCV / Пер. с англ. А. А. Слинкина; под ред. Д. А. Мовчана. М.: ДМК Пресс, 2017. 826 с.
8. **Zeller C., Faugeras O.** Camera self-calibration from video sequences: The Kruppa equations revisited // INRIA. Prog. 4 — Robotique, image et vision. Projet Robot vis. 1996. **2793**. URL: <https://inria.hal.science/inria-00073897/document> (дата обращения: 28.12.2023).
9. **Brown M., Lowe D. G.** Automatic panoramic image stitching using invariant features // Int. Journ. Comp. Vis. 2007. **74**, N 1. P. 59–73.
10. **Zhang Z.** A flexible new technique for camera calibration // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell. 2000. **22**, Iss. 11. P. 1330–1334.
11. **Google** Планета Земля. URL: <https://www.google.com/earth/about/versions/> (дата обращения: 28.12.2023).
12. **2ГИС.** URL: <https://info.2gis.com> (дата обращения: 28.12.2023).

Поступила в редакцию 28.12.2023

После доработки 28.12.2023

Принята к публикации 11.03.2024