

УДК 004.021

АЛГОРИТМ ДВУХЭТАПНОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕР С МАЛЫМИ УГЛОВЫМИ РАЗМЕРАМИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПОЛЕЙ ЗРЕНИЯ

И. А. Кудинов, аспирант кафедры электронно-вычислительных машин РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0003-1795-097X, e-mail: i.a.kudinov@yandex.ru

М. Б. Никифоров, к.т.н., доцент кафедры электронно-вычислительных машин РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0002-4796-0776, e-mail: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru

И. С. Холопов, к.т.н., декан факультета радиотехники и телекоммуникаций РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-5220-0811, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru

Рассмотрен алгоритм двухэтапной фотограмметрической калибровки камер панорамной обзорной системы технического зрения с распределенной апертурой с малыми (менее 10 %) относительными угловыми размерами пересечения полей зрения камер. Целью работы является разработка алгоритма калибровки, обеспечивающего при формировании панорамного кадра без учета информации о соответствующих парах особых точек (т.е. только по информации о внешних и внутренних параметрах камер) ошибку шивки порядка единиц пикселей. Идея алгоритма заключается в оценивании на первом этапе калибровки только матриц внутренних параметров камер и коэффициентов дисторсии, вносимой их объективами, с применением планарного тест-объекта с шаблоном типа «шахматное поле» или «радиально-кольцевые метки», а на втором – оценивание только их внешних параметров с применением объемного тест-объекта типа «реперный кластер», один из линейных размеров которого много больше двух других. Проведенный авторами эксперимент показал, что в отличие от известного алгоритма калибровки с вспомогательной камерой разработанный алгоритм обеспечивает до пяти раз меньшую абсолютную ошибку шивки панорамного кадра.

Ключевые слова: калибровка камеры, алгоритм оптимизации Левенберга – Марквардта, проективная камера, матрица внутренних параметров, дисторсия, модель Брауна – Конради, задача Perspective-n-Point, панорамное изображение.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-99-107

Введение

Актуальным направлением цифровой обработки изображений в обзорных системах технического зрения (СТЗ) является синтез панорамных изображений (ПИ) по информации от нескольких пространственно разнесенных камер [1-3]. СТЗ с такими камерами принято [4] называть системами с распределенной апертурой (РА).

Существует два основных подхода к синтезу ПИ:

1) поиск соответствий путем выделения особых точек (ОТ), описания их окрестностей с использованием дескрипторов, автоматический поиск пар соответствий ОТ [5] и оценка по ним матрицы гомографии [6-8];

2) поиск соответствий путем предварительной фотограмметрической калибровки камер по тест-объекту (ТО) [9, 10].

Преимуществом первого подхода является работоспособность даже при отсутствии априорных сведений о взаимном угловом и пространственном положении камер СТЗ с РА, преимуществом второго – сохранение работоспособности даже в сложных условиях наблюдения, в том числе на малоконтрастных наблюдаемых сценах и фонах с однородными текстурами, а также при малых (менее 10 % от ширины поля зрения) относительных угловых размерах пересечения полей зрения (ОУРППЗ) камер, когда количество ОТ и пар их соответствий мало.

Фотограмметрическая калибровка камер [6, 11, 12] предполагает оценку матриц внутренних параметров, внешних параметров и вектора параметров, характеризующих дистор-

сию их объективов, по ТО, на которых автоматически выделяются ОТ и выполняется поиск пар соответствий. Поэтому при малых ОУРППЗ камер СТЗ с РА матрицы их внешних параметров оцениваются с большей абсолютной ошибкой, чем при ОУРППЗ в 50 % и более, что не позволяет сформировать ПИ с абсолютной ошибкой сшивки соседних кадров в единицы пикселей.

Поэтому **целью работы** является синтез алгоритма фотограмметрической калибровки камер, позволяющего даже при малых ОУРППЗ обеспечить такую абсолютную погрешность оценивания их параметров, при которой обеспечиваются ошибки сшивки панорамного кадра порядка единиц пикселей.

Алгоритмы фотограмметрической калибровки нескольких камер

Если поля зрения N_k камер пересекаются и в каждом из них полностью наблюдается ТО, то алгоритм их взаимной калибровки предполагает [6, 11] выполнение численной минимизации функционала ошибки репроекции:

$$\sum_{i=1}^{N_{ТО}} \sum_{j=1}^{N_{ОТ}} \sum_{k=1}^{N_k} \left\| \mathbf{m}_{ij}^{(k)} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}^{(k)}, \mathbf{k}_d^{(k)}, \mathbf{R}_i^{(k)}, \mathbf{t}_i^{(k)}, \mathbf{M}_{ij}) \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\mathbf{K}^{(k)}$ – матрицы внутренних параметров камер, $\mathbf{R}_i^{(k)}$ и $\mathbf{t}_i^{(k)}$ – соответственно матрицы поворота и векторы параллельного переноса системы координат (СК), связанной с ТО, относительно СК k -й камеры для i -го калибровочного положения ТО, $\mathbf{M}_{ij} = [X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]^T$ – априорно известные пространственные координаты ОТ ТО в его i -м положении, $\mathbf{m}_{ij}^{(k)}$ – однородные пиксельные координаты проекции \mathbf{M}_{ij} на плоскость изображения k -й камеры, $N_{ОТ}$ – количество особых точек ТО, $N_{ТО}$ – количество калибровочных положений ТО. Векторы коэффициентов дисторсии \mathbf{k}_d принято [6] описывать моделью Брауна – Конради [13, 14] с тремя коэффициентами радиальной и двумя коэффициентами тангенциальной дисторсии k_1, k_2, k_3 и p_1, p_2 соответственно, $\mathbf{k}_d = [k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]^T$:

$$\begin{aligned} x_{ndi} &= D_x[(x_{ni}, y_{ni}), \mathbf{k}_d] = x_{ni} [1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [p_1 (r^2 + 2x_{ni}^2) + 2p_2 x_{ni} y_{ni}], \\ y_{ndi} &= D_y[(x_{ni}, y_{ni}), \mathbf{k}_d] = y_{ni} [1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + [2p_1 x_{ni} y_{ni} + p_2 (r^2 + 2y_{ni}^2)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $(x_{ni}, y_{ni}) = (x_i/f, y_i/f) = (X_i/Z_i, Y_i/Z_i)$, $r = (x_{ni}^2 + y_{ni}^2)^{1/2}$, $i = \overline{1, N_{ОТ}}$, (x_{ndi}, y_{ndi}) и (x_{ni}, y_{ni}) – соответственно нормированные координаты с дисторсией и без, f – фокусное расстояние камеры, выраженное в единицах размера пикселя, (x_i, y_i) – пиксельные координаты проекции точки $\mathbf{M}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ на плоскость изображения камеры, $D_x[\cdot]$ и $D_y[\cdot]$ – условные обозначения функционалов, реализующих модель дисторсии по строке и столбцу изображения соответственно. При $N_k = 2$ алгоритм калибровки в соответствии с (1) является алгоритмом калибровки стереопары [6].

Функционал $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{k}_d, \mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{M})$ в (1) описывает вычисление однородных пиксельных координат проекции точки \mathbf{M} на плоскость изображения в соответствии с математической моделью проективной камеры [6, 15, 16] с учетом коэффициентов дисторсии ее объектива [13, 14]:

$$\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}, \mathbf{k}_d, \mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{M}) = \mathbf{K} \begin{bmatrix} D_x \left[\left(\mathbf{M}_x^* / \mathbf{M}_z^*, \mathbf{M}_y^* / \mathbf{M}_z^* \right), \mathbf{k}_d \right] \\ D_y \left[\left(\mathbf{M}_x^* / \mathbf{M}_z^*, \mathbf{M}_y^* / \mathbf{M}_z^* \right), \mathbf{k}_d \right] \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}^* = [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \mathbf{M},$$

где символом « $\langle \langle \rangle \rangle$ » обозначена операция аугментации – пристыковки к матрице \mathbf{R} вектора-столбца \mathbf{t} справа.

Минимизация функционала (1), как правило [6, 11, 15, 16], выполняется с применением алгоритма Левенберга – Марквардта [17].

Алгоритм взаимной калибровки содержит следующие основные этапы:

1) съемка ТО с различных ракурсов; при этом ТО располагают таким образом, чтобы в различных калибровочных положениях его проекции в плоскости изображений камер попадали в разные части кадра и ОТ были распределены по полю кадра приблизительно равномерно;

2) автоматическое выделение ОТ на изображениях ТО и оценка их пиксельных координат с субпиксельной точностью;

3) поиск соответствий пиксельных координат изображений ОТ $\mathbf{m}_{ij}^{(k)}$ и физических координат ОТ ТО \mathbf{M}_{ij} ;

4) минимизация (1);

5) вычисление матриц трансформации [18] для перехода от СК a -й камеры к СК b -й камеры, $a, b = \overline{1, N_k}$, $a \neq b$:

$$\mathbf{T}_{ab} = \frac{1}{N_{\text{ТО}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТО}}} \mathbf{T}_i^{(a)} (\mathbf{T}_i^{(b)})^{-1}, \quad (3)$$

где матрица трансформации $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{0} = [0, 0, 0]^T$, и их декомпозиция для нахождения

матриц поворота \mathbf{R}_{ab} и векторов параллельного переноса \mathbf{t}_{ab} СК.

Для планарного ТО с шаблоном типа «шахматное поле» этапы 2)-5) могут быть реализованы с применением либо инструмента *Camera Calibration Toolbox* среды MATLAB, либо открытых библиотек для обработки изображений OpenCV.

При малых ОУРППЗ калибруемых камер попадание всех ОТ ТО в поле зрения камер выполняется только при больших удалениях ТО от их оптических центров, что увеличивает абсолютные ошибки оценивания пиксельных координат ОТ и, следовательно, искомых параметров $\mathbf{K}^{(k)}$, $\mathbf{R}_i^{(k)}$, $\mathbf{t}_i^{(k)}$ и $\mathbf{k}_d^{(k)}$.

По этой причине в [19] предлагается для повышения качества калибровки применять вспомогательную широкоугольную камеру (ВШК), поле зрения которой полностью или частично перекрывает поля зрения t калибруемых камер и t однотипных планарных ТО, каждый из которых в ходе калибровки попадает в поле зрения и i -й калибруемой камеры, $i = \overline{1, t}$, и ВШК. Выполнение рассмотренного выше алгоритма стереокалибровки для каждой пары «вспомогательная камера – i -я камера» позволяет сформировать по аналогии с (3) t матриц трансформации $\mathbf{T}_{\text{всп}i}$, $i = \overline{1, t}$. Однако применение ВШК, решая проблему уменьшения дальности от калибруемых камер до ТО, в свою очередь является источником дополнительных погрешностей, так как для широкоугольных (свыше 90°) объективов геометрические искажения на углах кадра плохо аппроксимируются моделью Брауна – Конради (2).

Алгоритм двухэтапной фотограмметрической калибровки

Для уменьшения ошибок оценивания калибровочных параметров авторы предлагают применять двухэтапный алгоритм калибровки, в котором на каждом из этапов используется свой ТО.

На первом этапе выполняют калибровку для каждой камеры СТЗ с РА по первому ТО (ТО1): например по планарным ТО, рассмотренным в работах [11] или [12]; при этом оценивают только матрицы внутренних параметров $\mathbf{K}^{(k)}$ и коэффициентов дисторсии объектива $\mathbf{k}_d^{(k)}$. Функционал (1) в таком случае вычисляется для каждой k -й камеры и преобразуется ($N_k = 1$) к виду:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{ТО}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОТ}}} \left\| \mathbf{m}_{ij}^{(k)} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{K}^{(k)}, \mathbf{k}_d^{(k)}, \mathbf{R}_i^{(k)}, \mathbf{t}_i^{(k)}, \mathbf{M}_{ij}) \right\|^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

При этом вычисленные в ходе минимизации (4) параметры $\mathbf{R}_i^{(k)}$ и $\mathbf{t}_i^{(k)}$ далее в алгоритме не учитываются.

На втором этапе применяют второй ТО (ТО2) в виде кластера [20, 21] из конструктивно связанных $n \geq 4$ реперных излучателей априорно известной конфигурации такого, что один из его линейных размеров (например, длина) много больше двух других (ширины и глубины); при этом оценивают только параметры \mathbf{R}_{ab} и \mathbf{t}_{ab} . Для этого в каждом пространственном положении ТО2 с применением алгоритмов *Perspective-n-Point (PnP)* [22, 23] оценивают пространственные координаты реперных точек кластера $\mathbf{M}_n^{(k)}$, $n = 1, \overline{N_{\text{реп}}}$, в СК каждой k -й камеры. По данным координатам выполняют оценку внешних параметров. Например, если в качестве опорной выбрана камера с номером a и требуется найти матрицу поворота \mathbf{R}_{ab} и вектор параллельного переноса \mathbf{t}_{ab} из ее СК в СК камеры b , то [18]

$$\mathbf{R}_{ab} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det(\mathbf{UV}^T) \end{bmatrix} \mathbf{V}^T, \quad \mathbf{t}_{ab} = \overline{\mathbf{M}^{(a)}} - \mathbf{R}_{ab} \overline{\mathbf{M}^{(b)}}, \quad (5)$$

где $\overline{\mathbf{M}^{(a)}} = \frac{1}{N_{\text{реп}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{реп}}} \mathbf{M}_n^{(a)}$, $\overline{\mathbf{M}^{(b)}} = \frac{1}{N_{\text{реп}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{реп}}} \mathbf{M}_n^{(b)}$, а вспомогательные матрицы \mathbf{U} и \mathbf{V} формируют в результате SVD-разложения матрицы \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \mathbf{USV}^T = \sum_{n=1}^{N_{\text{реп}}} \left(\mathbf{M}_{\text{центр}}^{(a)} \right)_n \left(\mathbf{M}_{\text{центр}}^{(b)} \right)_n^T, \quad (6)$$

где $\left(\mathbf{M}_{\text{центр}}^{(a)} \right)_n = \mathbf{M}_n^{(a)} - \overline{\mathbf{M}^{(a)}}$ и $\left(\mathbf{M}_{\text{центр}}^{(b)} \right)_n = \mathbf{M}_n^{(b)} - \overline{\mathbf{M}^{(b)}}$ – центрированные пространственные координаты реперов ТО2 в СК камер с номерами a и b соответственно, а $N_{\text{реп}}$ – количество реперов в ТО2.

Для повышения качества калибровки можно использовать несколько ($N_{\text{ТО2}}$) положений ТО2, увеличивая тем самым число соответствий в (6) с $N_{\text{реп}}$ до $N_{\text{ТО2}}N_{\text{реп}}$.

Алгоритм двухэтапной калибровки содержит следующие основные этапы:

1) съемка ТО1 с различных ракурсов; при этом ТО1 располагают таким образом, чтобы в различных калибровочных положениях его проекции в плоскости изображения калибруемой камеры попадали в разные части кадра и ОТ были распределены по полю кадра приблизительно равномерно;

2) автоматическое выделение ОТ на изображениях ТО и оценка их пиксельных координат с субпиксельной точностью;

3) поиск соответствий ОТ;

4) минимизация (4) и нахождение параметров $\mathbf{K}^{(k)}$ и $\mathbf{k}_d^{(k)}$;

5) съемка ТО2 с различных ракурсов; при этом ТО2 располагают таким образом, чтобы проекции его **реперов попадали в плоскости** изображений каждой из камер, поля зрения которых пересекаются; 6) оценка матриц поворота и векторов параллельного переноса СК камер с пересекающимися полями зрения для каждого положения ТО2 по (5) и (6).

При использовании планарных ТО, обладающих помимо контраста в видимом диапазоне оптического спектра еще и контрастом в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн [24], рассмотренный алгоритм калибровки позволяет формировать не только ПИ по информации от разноспектральных камер, но и успешно решать задачу совмещения изображений видимого и ИК диапазонов [25, 26].

Результаты полунатурного эксперимента

Экспериментальные исследования проводились с двумя камерами (рисунок 1) IDS uEye 5240 RE с мегапиксельными объективами Computar M0814-MP2 с фокусным расстоянием 8 мм, формировавшими полутоновые изображения 1280×1024 пикселей, с относительным перекрытием полей зрения в азимутальной плоскости в 10 %. Линейное расстояние между главными точками камер составляло 100 мм.

Калибровка камер выполнялась по двум алгоритмам:

1) стереокалибровка с ВШК, в качестве которой выступала камера Basler acA2000 (разрешение 2048×1088 пикселей) с мегапиксельным объективом Cowa с фокусным расстоянием 5 мм;

2) двухэтапная калибровка с применением в качестве ТО2 кластера с изменяемой конфигурацией светодиодных реперов ближнего инфракрасного диапазона (конструкция такого кластера приводится, например, в работе [27]); количество положений кластера $N_{ТО2} = 5$, ширина кластера – 130 мм, высота – 38 мм, глубина – 27 мм.



Рисунок 1 – Вид камер и двух ТО с шаблоном типа «шахматное поле» [11] при съемке с точки размещения ВШК

Figure 1 – View of cameras and two test objects with a «chessboard» pattern [11] when shooting from the location of the auxiliary camera

В каждом из алгоритмов калибровка выполнялась по двадцати положениям ТО с шаблоном типа «шахматное поле», содержащего 6 строк и 9 столбцов с размером клетки 30×30 мм. При калибровке с применением ВШК удаление ТО от калибруемых камер составляло от 600 до 1200 мм, от ВШК – от 1900 до 2500 мм. При двухэтапной калибровке удаление ТО (ТО1) от калибруемых камер на первом этапе составляло от 350 до 600 мм, а удаление ТО 2 на втором этапе – от 700 до 900 мм.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты сшивки панорамного изображения на основании полученных в ходе калибровки параметров по алгоритму формирования сферической панорамы, рассмотренному в [10], при съемке в помещении.



Рисунок 2 – Результат формирования панорамы при фотограмметрической калибровке со вспомогательной камерой

Figure 2 – Result of panorama formation during photogrammetric calibration with auxiliary camera



Рисунок 3 – Результат формирования панорамы при двухэтапной калибровке
Figure 3 – Result of panorama formation during two-stage calibration

В рассмотренном эксперименте за счет применения процедуры двухэтапной калибровки было достигнуто уменьшение ошибки сшивки с 19 (смещение изображений коробов на стене на кадрах с левой и правой камер на рисунке 2) до 4-х пикселей (изображения секторной мишени и ТО с шаблоном типа «шахматное поле» на рисунке 3).

Результаты формирования панорамы при двухэтапной калибровке и съемке вне помещения представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Результат формирования панорамы при двухэтапной калибровке и съемке вне помещения
Figure 4 – Result of panorama formation during two-stage calibration and outdoor shooting

Заключение

Применение алгоритма двухэтапной калибровки камер с малыми угловыми размерами пересечения полей зрения за счет уменьшения расстояния между камерами и тест-объектом при калибровке позволяет уменьшить погрешность оценивания матриц внутренних параметров и коэффициентов дисторсии, вносимой их объективами. Повышение качества калибровки в частном случае (при взаимных угловом и пространственном расположении камер как в эксперименте авторов) обеспечило снижение ошибки сшивки панорамного кадра в 5 раз.

Библиографический список

1. Бельский А., Жосан Н., Брондз Д., Горбачев К., Гребенщиков В., Каргаев А. Круглосуточная панорамная система технического зрения для вертолетов // Фотоника. 2013. Т. 38, №2. С. 80-86.
2. Лазаренко В. П., Джамийков Т. С., Коротаев В. В., Ярьшев 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.
3. Прудников Н. В., Шлишевский В. Б. Панорамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора. Вестник СГУГиТ. 2016. Т. 33, Вып. 1. С. 148-161.

4. AN/AAQ-37 Distributed Aperture System (DAS) for the F-35 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAAQ37F35/Pages/default.aspx> (дата обращения: 01.10.2020).
5. **Brown M., Lowe D.** Automatic panoramic image stitching using invariant features // International Journal of Computer Vision. 2007, vol. 74(1), pp. 59-73.
6. **Hartley R., Zisserman A.** Multiple View Geometry in Computer Vision: 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 656 p.
7. **Ефимов А. И., Новиков А. И.** Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений. Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 2. С. 258-265.
8. **Максимов В. А., Холопов И. С.** Алгоритм коррекции проективных искажений при маловысотной фото/видеосъемке по данным от инклинометра и дальномера // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 109-116.
9. **Кудинов И. А., Павлов О. В., Холопов И. С., Храмов М. Ю.** Алгоритм формирования видеопанорамы и его программная реализация с применением технологии CUDA // Информационные технологии и нанотехнологии ИТНТ-2017: сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. Самара: Новая техника, 2017. С. 1580-1586.
10. **Кудинов И. А., Никифоров М. Б., Холопов И. С.** Технология формирования разносектральной видеопанорамы // Радиотехника. 2019. № 5(6). С. 198-204.
11. **Zhang Z.** A flexible new technique for camera calibration // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000, vol. 22(11), pp. 1330-1334.
12. **Knyaz V. A., Sibiryakov A.V.** The development of new coded targets for automated point identification and non-contact 3D surface measurements. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 1998, vol, no. 5, 80 p.
13. **Brown D. C.** Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering. 1966, no. 5, pp. 444-462.
14. **Brown D. C.** Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering. 1971, vol. 37, no 8. pp. 855-866.
15. **Prince S.** Computer vision: models, learning and inference. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 665 p.
16. **Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J.** Close-range photogrammetry and 3D imaging. Berlin: De Gruyter, 2013. 684 p.
17. **More J.** The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics. 1978, vol. 630, pp. 105-116.
18. **Umeyama S.** Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991, vol. 13, no. 4, pp. 376-380.
19. **Широков Р. И., Алехнович В. И.** Увеличение углов поля зрения составной веб-камеры методом склеивания изображений // Контенант. 2014. № 4. С. 10-23.
20. **Larsson J., Blömqvist T.** The Cobra helmet mounted display system for Gripen // Head- and Helmet-Mounted Displays XIII: Design and Applications: Proc. of SPIE, vol. 6955. Orlando, 2008, pp. 1-9.
21. **Калинкин А. И., Кошелев В. И., Холопов И. С.** Исследование погрешности измерения координат объекта в системе автономной навигации по оптическим меткам. Вестник рязанского государственного Радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 10-17.
22. **Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P.** EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem. International Journal of Computer Vision. 2009, vol. 81, no. 2, pp. 155-166.
23. **Li S., Xu C., Xie M.** A robust O(n) solution to the Perspective-n-Point problem // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012, vol. 34, no. 7, pp. 1444-1450.
24. **Kudinov I. A., Nikiforov M. B., Kholopov I. S.** Camera and auxiliary sensor calibration for a multi-spectral panoramic vision system with a distributed aperture. Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1368, p. 032009.
25. **Kudinov I. A., Nikiforov M. B., Kholopov I. S., Muratov Ye. R.** Calibration based visible and infrared image superimposition for fusion task. MECO 2019 – Including ECYPS 2019: Proc. of 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing. Budva, Montenegro, 2019, pp. 315-320.
26. **Efimov A. I., Kudinov I. A., Melnik O.V., Nikiforov M. B., Kholopov I. S.** Digital multispectral images superimposition based on preliminary calibration or contour analysis: advantages and disadvantages // Proc. of ELEKTRO 2020 Conference. Taormina, Italy, 2020, pp. 1-6.
27. **Кудинов И. А., Павлов О. В., Холопов И. С.** Использование численного алгоритма оптимизации в задаче определения координат подвижного объекта по четырем реперным точкам и информации от одной камеры // Техническое зрение. 2015. Вып. 1(8). С. 32-39.

UDC 004.021

ALGORITHM FOR TWO-STAGE CALIBRATION OF CAMERAS WITH SMALL ANGULAR DIMENSIONS OF FIELDS OF VIEW INTERSECTION

I. A. Kudinov, post-graduate student, Department of Electronic Computing Machines, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-1795-097X, e-mail: i.a.kudinov@yandex.ru

M. B. Nikiforov, Ph.D. (Tech.), assistant professor, Department of Electronic Computing Machines, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-4796-0776, nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru

I. S. Kholopov, Ph.D. (Tech.), Dean of the Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5220-0811, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru

*The article discusses an algorithm for two-stage photogrammetric calibration of a distributed aperture panoramic vision system cameras with small (less than 10 %) relative angular dimensions of its fields of view intersection. **The aim of the work** is to develop a calibration algorithm that provides a stitching error of the order of pixel units when forming a panoramic frame without taking into account information about the corresponding pairs of special points (i.e., only by information about external and internal parameters of cameras). The idea of the algorithm is to evaluate at the first stage of calibration only the matrices of internal parameters of cameras and the coefficients of distortion introduced by their lenses, using a planar test object with a pattern such as «checkerboard» or «radial-ring marks», and at the second stage evaluating only their external parameters using a volumetric test object of «reference cluster» type, one of linear dimensions of which is much larger than the other two. The experiment carried out by the authors showed that in contrast to the well-known calibration algorithm with an auxiliary camera, the developed algorithm provides up to five times less absolute panoramic frame stitching error.*

Key words: camera calibration, Levenberg – Marquardt optimization algorithm, projective camera, matrix of camera internal parameters, distortion, Brown – Conrady model, Perspective-n-Point problem, panoramic image.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-99-107

References

1. **Belskiy A., Zhosan N., Brondz D., Gorbachev K., Grebenshikov V., Kargaev A.** *Kruglosutochnaja panoramnaja sistema tekhnicheskogo zrenija dlja vertoletov* (Day/night synthetic vision system). *Photonics*. 2013, vol. 38, no. 2, pp. 80-86.
2. **Lazarenko V. P., Dzhamiykov T. S., Korotaev V. V., Yarishev S. N.** Metod sozdaniya sfericheskikh panoram iz izobrazhenij, poluchennyh vsenapravlennymi optico-electronnymi sistemami (Method for creation of spherical panoramas from images obtained by omnidirectional optoelectronic systems). *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*. 2016. vol. 16, no. 1. pp. 46-53.
3. **Prudnikov N. V., Shlishevsky V. B.** Panoramnye optico-electronnye ustrojstva krugovogo i sektornogo obzora (All-round looking optoelectronic surveillance systems). *Vestnik SGUGiT*. 2016, vol. 33, no. 1. pp. 148-161.
4. AN/AAQ-37 Distributed Aperture System (DAS) for the F-35 [Electronic resource]. URL: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAAQ37F35/Pages/default.aspx> (request date: 01.10.2020).
5. **Brown M., Lowe D.** Automatic panoramic image stitching using invariant features. *International Journal of Computer Vision*. 2007, vol. 74, no. 1, pp. 59-73.
6. **Hartley R., Zisserman A.** *Multiple View Geometry in Computer Vision*: 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 656 p.
7. **Efimov A. I., Novikov A. I.** An algorithm for multistage projective transformation adjustment for image superimposition. *Computer Optics*. 2016, vol. 40, no. 2, pp. 258-265.

8. **Maksimov V. A., Kholopov I. S.** Algoritm korekcii proektivnyh iskazhenij pri malovysotnoj foto/videosjemke po dannym ot inklinometra i dal'nomera (Projective distortion correction algorithm at low altitude photo/video shooting on the data from inclinometer and range meter). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 58, pp. 109-116.

9. **Kudinov I. A., Pavlov O. V., Kholopov I. S., Khramov M. Ju.** Algoritm formirovaniya videopanoramy i ego programmaja realizacija c primeneniem tehnologii CUDA (The algorithm for a video panorama construction and its software implementation using CUDA technology). *Informacionnye tehnologii i nanotekhnologii ITNT-2017: sbornik trudov III mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly*. Samara: Novaja tehnika, 2017, pp. 1580-1586.

10. **Kudinov I. A., Nikiforov M. B., Kholopov I. S.** Tehnologija formirovaniya raznospektral'noj videopanoramy (Multispectral panorama forming technology). *Radiotekhnika*. 2019, vol. 83, no. 5-2, pp. 198-204.

11. **Zhang Z.** A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334.

12. **Knyaz V.A., Sibiryakov A.V.** The development of new coded targets for automated point identification and non-contact 3D surface measurements. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 1998. vol. 32, no 5, pp. 80.

13. **Brown D. C.** Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 1966, no. 5, pp. 444-462.

14. **Brown D. C.** Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*. 1971, vol. 37, no. 8, pp. 855-866.

15. **Prince S.** Computer vision: models, learning and inference. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, 665 p.

16. **Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J.** *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Berlin: De Gruyter, 2013, 684 p.

17. **More J.** The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. *Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics*. 1978, vol. 630, pp. 105-116.

18. **Umeyama S.** Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991, vol. 13, no. 4, pp. 376-380.

19. **Shirokov R. I., Alekhnovich V. I.** Uvelichenie uglov polja zrenija sostavnoj WEB-kamery metodom skleivaniya izobrazhenij (Compound webcam angles of field of vision extension by a method of images pasting together). *Contentant*, 2014, no. 4, pp. 10-23.

20. **Larsson J., Blömqvist T.** The Cobra helmet mounted display system for Gripen. *Head- and Helmet-Mounted Displays XIII: Design and Applications: Proc. of SPIE*, vol. 6955. Orlando, 2008. pp. 1-9.

21. **Koshelev V. I., Kalinkin A. I., Kholopov I. S.** Issledovanie pogreshnosti izmerenija koordinat ob'ekta v sisteme avtonomnoj navigatsii po opticheskim metkam (The research of object coordinate measurement accuracy by the optical marks in autonomous navigation system). *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 58, pp. 10-17.

22. **Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P.** EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem. *International Journal of Computer Vision*. 2009, vol. 81, no. 2, pp. 155-166.

23. **Li S., Xu C., Xie M.** A robust O(n) solution to the Perspective-n-Point problem. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012, vol. 34, no. 7, pp. 1444-1450.

24. **Kudinov I. A., Nikiforov M. B., Kholopov I. S.** Camera and auxiliary sensor calibration for a multispectral panoramic vision system with a distributed aperture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1368, pp. 032009.

25. **Kudinov I. A., Nikiforov M. B., Kholopov I. S., Muratov Ye. R.** Calibration based visible and infrared image superimposition for fusion task. *MECO 2019 – Including ECYPS 2019: Proc. of 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing*. Budva, Montenegro, 2019, pp. 315-320.

26. **Efimov A. I., Kudinov I. A., Melnik O. V., Nikiforov M. B., Kholopov I. S.** Digital multispectral images superimposition based on preliminary calibration or contour analysis: advantages and disadvantages. *Proc. of ELEKTRO 2020 Conference*. Taormina, Italy, 2020. pp. 1-6.

27. **Kudinov I. A., Pavlov O. V., Kholopov I. S.** Ispolzovanie chislennogo algoritma optimizatsii v zadache opredelenija koordinat podvizhnogo ob'ekta po chetyrem repnym tochkam i informatsii ot odnoj kamery (Using a numerical optimization algorithm in the problem of determining the coordinates of a moving object by the four reference points and information from a single camera). *Tekhnicheskoe zrenie*. 2015, vol. 8, pp. 32-39.