

Поиск оптимального расположения маркеров в пространстве при калибровке камеры фотограмметрической измерительной системы

Б. Н. МАРКОВ, А. А. ХОХОЛИКОВ, С. Г. КОНОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия,
e-mail: khokholikov@gmail.com

Рассмотрен принцип фотограмметрических измерений. Описаны процедура калибровки камеры, входящей в состав фотограмметрической системы, и способ оценки качества калибровки. Приведены результаты экспериментов по определению оптимального расположения маркеров в пространстве при калибровке.

Ключевые слова: фотограмметрия, пространственная измерительная система, калибровка, калибровочная матрица, маркер.

The article reviews the principles of photogrammetric measurements. The photogrammetric system camera calibration procedure and the method for estimation of calibration quality are described. The results of research on determination of the marker optimal spatial position in calibration process are presented.

Key words: photogrammetry, spatial measurement system, calibration, calibration matrix, marker.

Фотограмметрические измерения решают задачу, обратную задаче фотографирования. Если при фотографировании поверхность трёхмерного объекта проецируется на плоскость фотоснимка, то при фотограмметрическом преобразовании, наоборот, графическая информация (изображение) служит для восстановления трёхмерной поверхности объекта. При фотографировании теряется часть информации о реальном объекте. В первую очередь это происходит потому, что трёхмерная поверхность проецируется на плоскость снимка, в результате чего утрачивается информация о глубине предметов. Однако данная проблема легко решается использованием большего числа снимков, на которых были бы зафиксированы все интересующие детали объекта. Часть же информации теряется безвозвратно по таким принципиально непреодолимым причинам, как ограничения разрешающей способности фотографической техники, несовершенство фотограмметрической модели и применяемых алгоритмов обработки изображений. Одним из наиболее важных и требующих отдельного исследования источников систематической погрешности является погрешность калибровки измерительной системы. Минимизация издержек процедуры калибровки позволит создавать более точные и быстродействующие измерительные системы, поэтому исследования в данной области являются крайне актуальными. Прежде чем приступить к подробному обсуждению процедуры калибровки, остановимся на математическом аппарате, лежащем в основе фотограмметрических измерений.

На рис. 1 показана схема фотограмметрической системы, в которой используется центральная проективная модель камер. На схеме изображены оптические центры C' , C'' двух камер. Точка M находится на поверхности исследуемого объекта, а m' , m'' представляют её проекции на плоскости левого и правого фотоснимков, соответственно. Задача фотограмметрии заключается в определении положения точки M в системе координат (X, Y, Z) по линиям проекционной связи, проходящим через оптические центры камер C' , C'' и

точки m' , m'' , соответственно. Начало отсчёта и ориентация осей системы (X, Y, Z) устанавливаются произвольным образом на этапе калибровки.

Положение точки m' в системе координат (x', y') , связанной со снимком, сделанным камерой с центром в точке C' , вычисляется через координаты точки M в системе (X, Y, Z) с помощью следующих формул [1]:

$$\begin{cases} (x'_m - x'_0) = -f' \frac{a'_1(X_M - X_{C'}) + b'_1(Y_M - Y_{C'}) + c'_1(Z_M - Z_{C'})}{a'_3(X_M - X_{C'}) + b'_3(Y_M - Y_{C'}) + c'_3(Z_M - Z_{C'})}, \\ (y'_m - y'_0) = -f' \frac{a'_2(X_M - X_{C'}) + b'_2(Y_M - Y_{C'}) + c'_2(Z_M - Z_{C'})}{a'_3(X_M - X_{C'}) + b'_3(Y_M - Y_{C'}) + c'_3(Z_M - Z_{C'})}, \end{cases} \quad (1)$$

где x'_m , y'_m — координаты центральной проекции m' точки

M на плоскость снимка в системе координат (x', y') ; x'_0 , y'_0 — координаты точки пересечения главной оптической оси камеры с плоскостью снимка, X_M , Y_M , Z_M — координаты точки M в системе (X, Y, Z) .

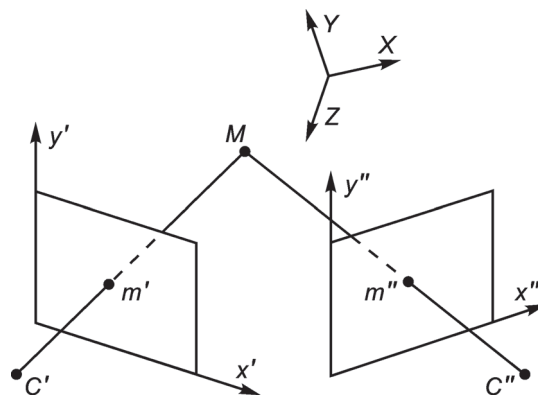


Рис. 1. Принципиальная схема фотограмметрической системы

Координаты оптического центра камеры X_C, Y_C, Z_C в системе (X, Y, Z) , а также параметры $a'_1, a'_2, a'_3, b'_1, b'_2, b'_3, c'_1, c'_2, c'_3, f', x'_0, y'_0$ должны быть найдены во время калибровки системы.

Поскольку целью измерительной процедуры является определение трёх координат точки M , а система (1) содержит лишь два уравнения, то к первой камере добавляется вторая, и вместе они формируют фотограмметрическую систему. Для второй камеры с центром в точке C'' имеет место аналогичная (1) пара уравнений, с той лишь разницей, что все одинарные штрихи заменяются двойными. В настоящей работе акцент делается на калибровке каждой из камер в отдельности. В связи с этим для упрощения записи формул в дальнейшем штрихи опустим.

Многие из известных подходов к калибровке камер сводятся к использованию геометрических примитивов с априорной информацией об их пространственном положении, ориентации и форме. Далее рассмотрим процедуру калибровки с применением калибровочной матрицы, состоящей из белой поверхности, на которую нанесены чёрные круги — маркеры. Расположение маркеров на матрице показано на рис. 2. Расстояния D между соседними маркерами в вертикальном и горизонтальном направлениях равны и составляют 16 мм. Калибровочную матрицу устанавливали в специальных направляющих с возможностью её точного перемещения в направлении нормали к плоскости маркеров.

При проведении опытов для калибровки камеры выполняли следующие шаги. Прежде всего, выбирали прямоугольную правостороннюю декартову систему координат (X, Y, Z) , ось аппликат Z которой была направлена параллельно главной оптической оси камеры. Направление оси Z было таким, чтобы аппликата фотографируемого объекта возрастала по мере его приближения к камере. Затем делали серию из девяти снимков калибровочной матрицы. На каждом снимке матрицу фиксировали перпендикулярно оси аппликат в некотором положении $Z_k, k = 1, \dots, 9$, а перемещения матрицы между снимками были такими, чтобы координаты точки пересечения оси Z с плоскостью матрицы оставались постоянными. Шаг перемещения составлял $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i = 50$ мм. Начало отсчёта системы координат (X, Y, Z) находилось в центре левого нижнего маркера в дальнем от камер положении матрицы. При проведении опытов камера оставалась в фиксированном положении.

Таким образом, в результате фотографирования калибровочной матрицы во всех девяти положениях получали совокупность маркеров, располагавшихся в узлах пространственной решетки (далее — калибровочной решетки). Для проведения калибровки вычисляли двухмерные координаты проекций маркеров на каждом из снимков, а также трёхмерные координаты совокупности маркеров в системе (X, Y, Z) .

Рис. 2. Калибровочная матрица

Двухмерные координаты маркеров на снимках определяли с помощью программы. Для ускорения этого процесса изображения подвергали обработке нормализующим фильтром и бинаризации, после чего проводили упрощённый корреляционный анализ для нахождения ориентировочных положений маркеров. Полученные таким образом координаты уточняли методом поиска центра масс для каждого из распознанных маркеров. Подробнее данная процедура описана в [2]. Хотя указанная программа распознает все имеющиеся на изображениях маркеры, при калибровке использовали лишь часть из них. При проведении опытов в каждом положении поверхности учитывали не более 50 из 100 имеющихся маркеров. Подробнее данный вопрос опишем ниже.

После вычисления двухмерных координат задавали трёхмерные координаты тех маркеров, которые применяли при калибровке. Для этого в программу вносили лишь координаты того маркера, который был выбран в качестве начала отсчёта, а координаты остальных маркеров вычисляли в автоматическом режиме с учётом известных расстояний между узлами калибровочной решетки.

При калибровке камеры необходимо найти все неизвестные параметры внешнего и внутреннего ориентирования, входящие в систему (1), их количество равно 15. Для вычисления калибровочных параметров камеры применяли метод наименьших квадратов (МНК). Для этого систему (1) приводили к матричному виду с одновременным сокращением количества параметров с 15 до 11:

$$Ap = b + \delta. \quad (2)$$

Здесь матрица A имеет размерность $2N \times 11$, где N — количество маркеров, по которым производится калибровка. Первые восемь столбцов матрицы A содержат координаты маркеров M_i в системе (X, Y, Z) :

$$\begin{pmatrix} X_{M_1} & Y_{M_1} & Z_{M_1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{M_1} & Y_{M_1} & Z_{M_1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{M_N} & Y_{M_N} & Z_{M_N} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{M_N} & Y_{M_N} & Z_{M_N} & 1 \end{pmatrix}.$$

Последние три столбца матрицы A — произведения координат маркеров M_i в системе (X, Y, Z) и их проекций m_i в системе (x, y) :

$$\begin{pmatrix} X_{M_1}(x_{m_1} - x_0) & Y_{M_1}(x_{m_1} - x_0) & Z_{M_1}(x_{m_1} - x_0) \\ X_{M_1}(y_{m_1} - y_0) & Y_{M_1}(y_{m_1} - y_0) & Z_{M_1}(y_{m_1} - y_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{M_N}(x_{m_N} - x_0) & Y_{M_N}(x_{m_N} - x_0) & Z_{M_N}(x_{m_N} - x_0) \\ X_{M_N}(y_{m_N} - y_0) & Y_{M_N}(y_{m_N} - y_0) & X_{M_N}(y_{m_N} - y_0) \end{pmatrix}.$$

Столбец p состоит из 11 элементов, являющихся комбинациями параметров $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, f, X_C, Y_C, Z_C$, входящих в систему (1):

$$p = \frac{1}{a_3 X_C + b_3 Y_C + c_3 Z_C} \begin{pmatrix} a_1 f \\ b_1 f \\ c_1 f \\ -(a_1 f X_C + b_1 f Y_C + c_1 f Z_C) \\ a_2 f \\ b_2 f \\ c_2 f \\ -(a_2 f X_C + b_2 f Y_C + c_2 f Z_C) \\ a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Столбец b состоит из координат проекций m_i :

$$b = \begin{pmatrix} x_{m_1} - x_0 \\ y_{m_1} - y_0 \\ \dots \\ x_{m_N} - x_0 \\ y_{m_N} - y_0 \end{pmatrix}.$$

Столбец δ состоит из невязок, определяющих разницу между левыми и правыми частями уравнений, входящих в (2). Систему (2) решим с использованием известного аналитического соотношения $p = (A^T A)^{-1} A^T b$ [3], исходя из предположения, что для рассматриваемой области измерений невязки δ являются независимыми нормально распределёнными случайными величинами с нулевым математическим ожиданием. Подробнее вопрос калибровки камер с применением МНК описан в [4].

При проведении экспериментов считаем, что точка (x_0, y_0) находится в центре снимка.

В ходе исследования проведена серия опытов по калибровке камеры с разными наборами маркеров.

Набор первый. Маркеры с нечётными номерами, расположенные в двух сечениях решётки, параллельных плоскости OYZ, с координатами $X_1 = 0, X_2 = D$, где D — расстояние между соседними маркерами калибровочной матрицы в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Набор второй. Маркеры с нечётными номерами, расположенные в двух параллельных плоскости OXZ сечениях решётки с координатами $Y_1 = 0, Y_2 = D$.

Набор третий. Маркеры с нечётными номерами, расположенные в двух параллельных плоскости OXY сечениях решётки с координатами $Z_1 = 400$ мм, $Z_2 = 350$ мм (ближайшие к камере положения калибровочной матрицы).

Набор четвёртый. Маркеры с нечётными номерами, расположенные в двух параллельных плоскости OXY сечениях решётки с координатами $Z_1 = 50$ мм, $Z_2 = 0$ (наиболее отдалённые от камеры положения калибровочной матрицы).

Набор пятый. Маркеры с нечётными номерами, расположенные в девяти сечениях решётки, параллельных плоскости OXY и соответствующих всем положениям калибровочной матрицы вдоль оси Z.

Набор шестой. Все маркеры, расположенные в двух параллельных плоскости OYZ сечениях решётки с координатами $X_1 = 0, X_2 = 10D$ мм, соответственно, и в двух параллель-

ных плоскости XYZ сечениях решётки с координатами $Y_1 = 0, Y_2 = 10D$ мм, соответственно.

Как критерий оценки качества калибровки использовали сумму квадратов отклонений вычисленных координат маркеров $(x_{m_i}^B, y_{m_i}^B)$ от координат $(x_{m_i}^{np}, y_{m_i}^{np})$, определённых с помощью описанной выше программы:

$$S = \sum_{i=1}^N \left((x_{m_i}^{np} - x_{m_i}^B)^2 + (y_{m_i}^{np} - y_{m_i}^B)^2 \right). \quad (4)$$

Значение S вычисляли для всех маркеров, находящихся в узлах калибровочной решётки, которые не использовались при калибровке. Значение $\sigma = \sqrt{S/N}$ можно считать стандартным отклонением для полученного комплекса невязок в системе (2).

Для ответа на вопрос, как изменяется точность определения координат точек по мере их удаления от области калибровки камеры, камеру калибровали по первому, второму, третьему и четвёртому наборам маркеров. В этом случае исследовали зависимости

$$\sigma(X) = \sqrt{S(X)/N}; \quad \sigma(Y) = \sqrt{S(Y)/N}; \quad \sigma(Z) = \sqrt{S(Z)/N}.$$

Для ответа на вопрос, существует ли возможность сократить количество используемых для калибровки маркеров без снижения точности калибровки, камеру калибровали по пятому и шестому наборам маркеров. Далее для обоих наборов сравнивали полученные зависимости $\sigma(Z) = \sqrt{S(Z)/N}$.

Координаты проекций в (4) вычисляли по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_{m_i} &= x_0 - \frac{p_0 X_{M_i} + p_1 Y_{M_i} + p_2 Z_{M_i} + p_3}{p_8 X_{M_i} + p_9 Y_{M_i} + p_{10} Z_{M_i} - 1}; \\ y_{m_i} &= y_0 - \frac{p_4 X_{M_i} + p_5 Y_{M_i} + p_6 Z_{M_i} + p_7}{p_8 X_{M_i} + p_9 Y_{M_i} + p_{10} Z_{M_i} - 1}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $p_j, j = 0, \dots, 10$ — элементы столбца p .

Соотношения (5) получены из системы (1) с учётом (3) для калибровочных параметров камеры.

Единицей измерения σ являются пиксели. При этом цена пиксела зависит от расстояния между калибровочной матрицей и камерой. В ближайших к камере положениях матрицы каждому маркеру соответствует большее количество пикселей, чем в более отдалённых положениях, тогда как размер маркеров в действительности остаётся одним и тем же. Вклад данного фактора в зависимость $\sigma(Z)$ можно уменьшить, если воспользоваться специальным масштабирующим коэффициентом k , переводящим значение σ из пикселей в миллиметры: $\sigma_{mm} = k \sigma_p$, где $k = d_{mm}/d_p$, d_{mm} — расстояние в миллиметрах между левым верхним и правым нижним маркерами матрицы; d_p — расстояние в пикселях между образами тех же маркеров на снимках. Коэффициент k вычисляется для каждого положения калибровочной матрицы вдоль оси Z.

Результаты опытов показали, что σ возрастает при удалении от пространственной области, содержащей маркеры, по которым совершалась калибровка. В дальнейшем будем называть её областью (зоной) измерения. Данная закономерность наблюдается по всем осям X, Y, Z.

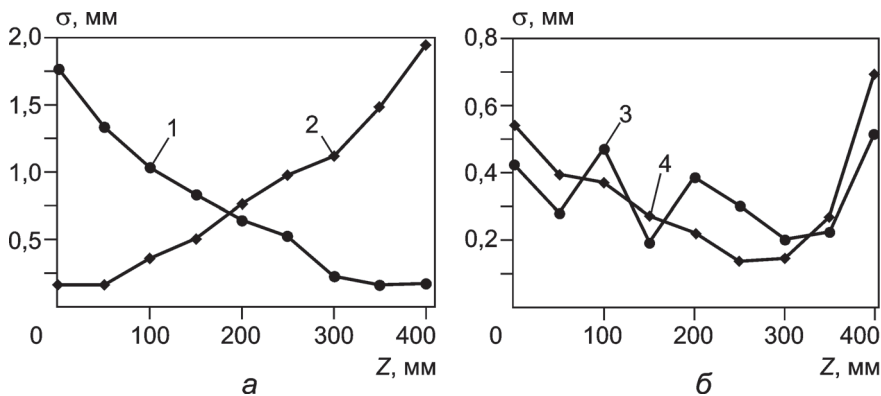


Рис. 3. Зависимости $\sigma(Z)$ при калибровке по различным наборам маркеров:
а — по третьему (1) и четвертому (2); б — по пятому (3) и шестому (4)

На рис. 3, а представлены зависимости $\sigma(Z)$ при калибровке по третьему и четвертому наборам маркеров. Зависимости $\sigma(X)$, $\sigma(Y)$ при удалении от зоны измерения имеют сходный вид и также представлены кривыми, имеющими минимальное значение в точках, расположенных внутри зоны измерения, и возрастающими по мере удаления от неё. По мере удаления от области, содержащей узлы решётки, по которым производилась калибровка, значение σ возрастает. Отсюда следует, что для повышения точности вычисления калибровочных параметров необходимо калибровать камеру по маркерам, охватывающим всю зону измерения.

Рассмотрим результаты опытов по уменьшению количества маркеров при калибровке камеры. Проведенные эксперименты показали, что калибровка по пятому и шестому наборам маркеров даёт близкие по значениям σ результаты. Поэтому можно сделать вывод, что систему достаточно калибровать по пятому набору маркеров. Преимущество такой калибровки заключается в снижении вычислительных затрат при определении калибровочных параметров из-за уменьшения количества используемых маркеров. Зависимости $\sigma(Z)$ для обоих наборов калибровочных маркеров приведены на рис. 3, б.

Кроме шестого набора были проведены опыты и с другими наборами маркеров, которые требуют меньше вычислительных операций по сравнению с пятым набором. По результатам сравнения оказалось, что использование малого количества маркеров для калибровки часто даёт нестабильные результаты. Шестой набор оказался наилучшим среди прочих наборов с пониженным числом маркеров с точки зрения соотношения стабильности, точности калибровки и количества используемых маркеров.

В результате проведённых исследований установлено, что узлы решётки, по которым выполняется калибровка камеры, должны охватывать всю область измерений, и по мере

удаления от этой области точность фотограмметрической системы заметно снижается. Кроме того, были проведены опыты по уменьшению количества используемых для калибровки узлов калибровочной решётки. Были получены результаты, позволяющие снизить количество калибровочных маркеров, что позволяет повысить производительность данной процедуры в результате уменьшения количества вычислительных операций. Также описан механизм вычисления калибровочных параметров камеры с использованием аналитического решения, полученного МНК. Полученные выводы могут быть учтены при разработке эффективного алгоритма калибровки и взяты за основу дальнейших исследований, направленных на создание современных высокоточных фотограмметрических измерительных систем.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 9.2545.2014/К).

Литература

1. Назаров А. С. Фотограмметрия. Минск.: ТетраСистемс, 2006.
2. Конов С. Г., Хохликов А. А., Скворцова В. В. Алгоритм быстрого распознавания измерительных маркеров, используемых в бесконтактных измерительных системах // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 9—11.
3. Крянев А. В., Лукин Г. В., Удумян Д. К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012.
4. Конов С. Г., Гололобова А. А. Калибровка камер фотограмметрических измерительных систем на базе метода наименьших квадратов // Метрология. 2014. № 5. С. 15—20.
5. Григорьев С. Н., Конов С. Г. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 9—13.
6. Марков Б. Н., Конов С. Г., Логинов А. А. Калибровка камер фотограмметрических измерительных систем с использованием генетического алгоритма поиска решения // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 44—46.
7. Конов С. Г., Марков Б. Н. Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.
8. Конов С. Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 2. С. 119—121.

Дата принятия: 20.01.2016.