

КАЛИБРОВКА ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЗОРНОСТИ КАБИНЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Б.Б. Виленчиц¹, Н.И. Мурашко², В.К. Попов¹, П.Н. Чурак²

¹НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Минск

²Объединенный институт проблем информатики, Минск

При разработке информационно-измерительной системы контроля обзорности кабины с места водителя автотранспортного средства были определены методы и средства получения исходной измерительной информации для последующей обработки, вычисления и оценки результатов измерений и их соответствия требованиям стандартов. При этом обосновано применение в качестве средств ввода измерительных данных цифровых фотокамер, как наиболее удовлетворяющих требованиям по точности измерений, формированию выходных данных в цифровом виде с непосредственной передачей полученной информации в компьютер системы для последующей обработки и анализа, уровню автоматизации процессов измерений и контроля, стоимостным характеристикам.

Приведены и рассмотрены основные оптические, электронные и эксплуатационные характеристики камер, непосредственно влияющие на обеспечение точностных параметров средств измерений, удобство эксплуатации, возможности автоматизации измерений.

Выбраны и сопоставлены конкретные модели цифровых камер соответствующего класса и стоимостного уровня для использования в информационно-измерительной системе. Основные виды оптоэлектронных характеристик, оказывающих решающее влияние на качество получаемых с помощью камер цифровых изображений: разрешение (камеры с матрицей 3 мегапикселей, обеспечивающие формат изображения 2048x1536 пикселей), яркостные, контрастные и цветовые свойства, резкость, выбор фрагментов и их ракурсов (удаление и приближение). Важную роль играют также параметры, связанные с цифровыми форматами получаемых изображений, хранением полученных данных, передачей их в компьютер, а также возможности камеры по передаче данных (интерфейсы обмена) и внешнему управлению ее работой от компьютера, методика калибровки.

Калибровка камер – это процесс соотнесения идеальной математической модели камеры с конкретным физическим устройством, а также определение ориентации и расположения камеры в системе координат сцены. Методы калибровки камер можно грубо разделить на две категории: фотограмметрическая калибровка и самокалибровка.

Фотограмметрическая калибровка камеры выполняется путем наблюдения за калибровочным шаблоном, геометрия которого в 3D пространстве известна с большой точностью. Такая калибровка может быть очень эффективной. Калибровочный шаблон обычно состоит из двух или трех перпендикулярных плоскостей, как показано на рис. 1. Для такого подхода необходима дорогая калибровочная аппаратура и сложная установка.

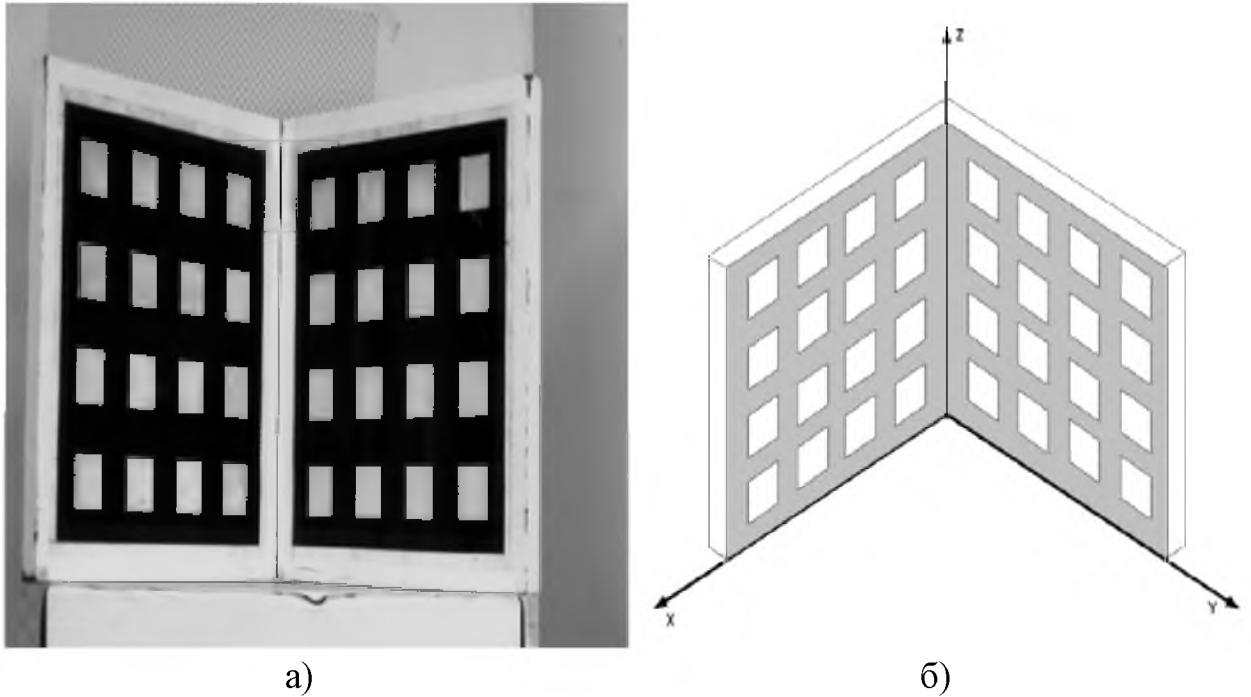


Рис. 1 Общий вид калибровочного шаблона. а) Калибровочная сетка. б) Система координат шаблона.

Методы самокалибровки не используют калибровочный шаблон. Всю информацию получают из изображений после перемещения камеры по статической сцене.

В зависимости от используемой математической модели камеры параметры, которые необходимо определить, различны. В нашем случае при использовании модели с точечной диафрагмой, все параметры, которые необходимо определить, можно разделить на две категории:

- внутренние параметры: внутренняя геометрия и оптические характеристики линз, параметры устройства отображения;

- внешние параметры: ориентация и расположение камеры в системе координат сцены.

Таким образом, процесс калибровки камер можно разделить на два этапа:

- внутренняя калибровка;

-внешняя калибровка.

Для определения внутренних, внешних параметров камеры и определения геометрической калибровки камеры, производится несколько снимков плоскости с набором характерных элементов, таких как точки, положение которых известно относительно определенной фиксированной внешней системы координат. В таком случае калибровку камеры можно смоделировать как процесс оптимизации, при котором разница между элементами наблюдаемого изображения и их теоретическими положениями, предсказанными через уравнения перспективной проекции, минимизируется относительно внешних и внутренних параметров камеры. Расположение калибровочных плоскостей относительно внешней системы координат и системой координат камеры представлено на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

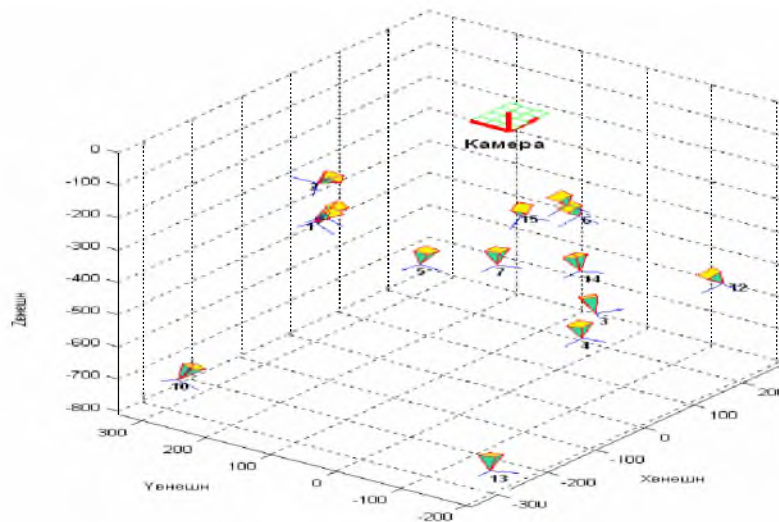


Рис. 2. Расположение калибровочных шаблонов и камеры во внешней системе координат.

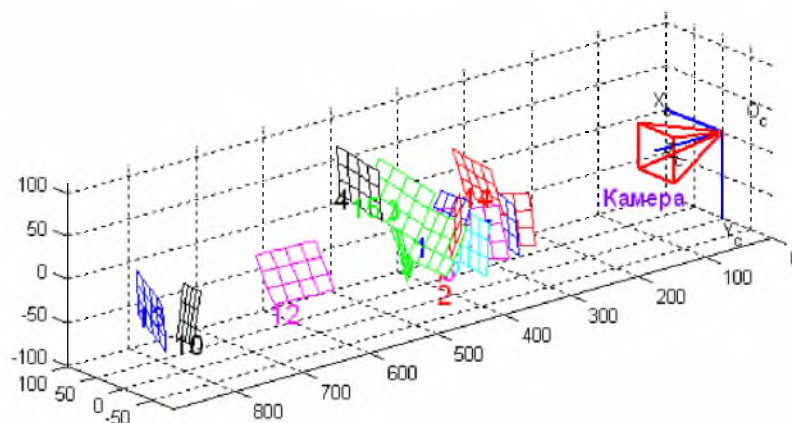


Рис. 3. Расположение калибровочных шаблонов в системе координат камеры.

Плоскость изображения камеры параллельную ее физической чувствительной области, но расположенную на единичном расстоянии от отверстия, будем называть ее картинной плоскостью. К этой плоскости будет привязана ее собственная система координат, начало которой будет находиться в точке пересечения плоскости, называемой главной точкой, с оптической осью.

Точка в двумерном пространстве обозначается через $m = [u, v]^T$. Точка в трехмерном пространстве обозначается $M = [X, Y, Z]^T$. Камера моделируется обычной точечной диафрагмой: зависимость между точкой в трехмерном пространстве M и ее проекцией на изображение m представляется:

$$sm \tilde{m} = A[R, t] \tilde{M}, \quad (1)$$

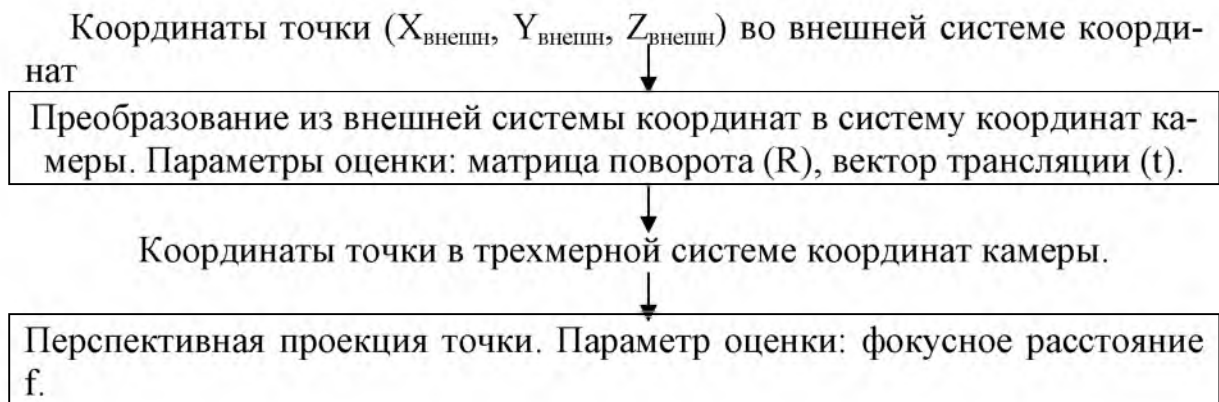
где s - произвольный масштабный коэффициент, $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ и $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ - однородные координаты векторов.

R и t называются внешними параметрами камеры, (R - матрица вращения, t - вектор трансляции). Они связывают внешнюю систему координат с системой координат камеры, и A - матрица внутренних параметров камеры:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

в которой (u_0, v_0) - координаты главной точки, α и β - масштабные коэффициенты изображения по осям u и v , и γ - параметр, описывающий наклон двух координатных осей камеры (следствие некоторой производственной ошибки).

Итак, перенос точки из внешней системы координат в координаты пикселей устройства можно представить следующей схемой.



(X_u, Y_u) Идеальные координаты точки на неискаженном изображении.

Радиальное искажение линзы. Параметры которые необходимо оценить: коэффициенты искажения k_1 и k_2 .

(\tilde{X}, \tilde{Y}) Координаты точки на искаженном изображении.

Переход к системе координат физически чувствительной области камеры. Параметры оценки: α и β - масштабные коэффициенты изображения по осям (aspect ratio), γ - наклон координатных осей камеры, u_0 и v_0 - главные точки.

Координаты точки, в пикселях, на физически чувствительной области камеры.

Для представления гомографии между плоскостью объекта и ее изображением, предположим, что плоскость объекта находится на расстоянии

$Z = 0$ во внешней системе координат.

Обозначим i -тую колонку матрицы вращения R через r_i . Тогда из (1) получим:

$$s \begin{bmatrix} v \\ u \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Пренебрегая записью, мы используем M , чтобы обозначить точку на плоскости объекта, но $M = [X, Y]^T$, так как координата Z всегда равна 0. В свою очередь, $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$. Поэтому, точка на плоскости M и на изображении m связываются через матрицу проекции H :

$$s\tilde{m} = H\tilde{M} \quad (2)$$

где $H = A [r_1 \ r_2 \ t]$.

Если имеется изображение плоскости объекта, то можно установить проективное преобразование (или гомографию). Обозначив матрицу проекции через $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$, из (1), получим:

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A [r_1 \ r_2 \ t]$$

где λ - произвольный скаляр. Зная, что r_1 и r_2 перпендикулярны друг к другу, имеем:

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \quad (3)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \quad (4)$$

Так как матрица проекции имеет 8 степеней свободы, а также имеется 6 внешних параметров (3 для поворота и 3 для смещения), тогда можно получить два ограничения на внутренние параметры. Отметим, что $A^{-T}A^{-1}$ фактически описывает изображение абсолютного конического сечения.

Для калибровки камеры можно использовать эффективный метод, предложенный Зангом.

Пусть

$$B = A^{-T}A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & \frac{-\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ \frac{-\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & \frac{-\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & \frac{-\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}$$

Учитывая, что матрица B симметрична, определим ее через 6-вектор

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T. \quad (5)$$

Обозначим i -тый вектор-столбец H через $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$. Тогда

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b, \quad (6)$$

где $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$.

Поэтому два фундаментальных ограничения (2) и (3) можно переписать как два однородных уравнения:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (7)$$

Если имеется n изображений плоскости объекта, то составляя n таких уравнений как (7) мы имеем:

$$Vb = 0, \quad (8)$$

где V - $2n \times 6$ матрица.

При $n \geq 3$ существует, в общем случае, единственное решение b , определенное с точностью до масштабного коэффициента. При $n = 2$ можно предположить, что перекося $\gamma = 0$, то есть, $[0, 1, 0, 0, 0, 0]^T b = 0$, которое добавляется как дополнительное уравнение к (8). При $n = 1$ можно определить только два внутренних параметра камеры, например α и β , предполагая, что u_0 и v_0 известны (например, центр изображения) и $\gamma = 0$.

Решением (8) является собственный вектор $V^T V$, соотнесенный с минимальным собственным значением.

Как только определен вектор b , можно определить всю матрицу внутренних параметров камеры:

$$\begin{aligned}v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\ \lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11} \\ \alpha &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ \beta &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\ \gamma &= -B_{12}\alpha^2\beta / \lambda \\ u_0 &= \gamma v_0 / \beta - B_{13}\alpha^2 / \lambda.\end{aligned}$$

После оценки матрицы A , можно легко вычислить внешние параметры для каждого изображения. Из (1), мы имеем:

$$r_1 = \lambda A^{-1}h_1; \quad r_2 = \lambda A^{-1}h_2; \quad r_3 = r_1 \times r_2; \quad t = \lambda A^{-1}h_3,$$

где $\lambda = 1/|A^{-1}h_1| = 1/|A^{-1}h_2|$.

Для улучшения результатов можно воспользоваться оценкой максимального правдоподобия. Данный подход основан на минимизации расстояний между измеренными проекциями опорных точек и вычисленными в соответствии с (1).

Пусть имеется n изображений плоскости объекта, а также имеется m точек на этой плоскости, координаты которых нам известны. Предположим, точки на изображении искажаются вследствие наложения независимого одинаково распределенного шума. Оценку максимального правдоподобия можно получить, минимизируя следующий функционал:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - m'(A, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (9)$$

где $m'(A, R_i, t_i, M_j)$ – это проекция точки M_j на изображении i в соответствии с уравнением (1).

Минимизация (9) – это проблема нелинейной минимизации, которая решается с помощью алгоритма Левенберга-Маркуардта. В этом алгоритме требуются начальные предположения об A , $\{R_i, t_i \mid i = 1..n\}$. После реализации такого подхода мы получаем более точную оценку матрицы перспективной проекции, однако, без учета радиального искажения.

При учете радиального искажения считалось, что рассматриваемая камера оснащена совершенными линзами. Тем не менее, реальные линзы обладают рядом aberrаций. Рассмотрим только первые два члена радиального искажения, т.к. функция искажения наиболее доминирует в первых членах.

Пусть (u, v) будут идеальные (неискаженные) координаты пикселей изображения и (\tilde{u}, \tilde{v}) соответствующие наблюдаемые координаты на изображении. Идеальные точки – это проекции точек плоскости в соответствии с моделью камеры. Также, (x, y) и (\tilde{x}, \tilde{y}) – идеальные (неискаженные) и действительные координаты картинной плоскости. Из этого мы имеем:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= x + x [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2], \\ \tilde{y} &= y + y [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2],\end{aligned}$$

где k_1, k_2 коэффициенты радиального искажения. Центр радиального искажения совпадает с главной точкой. Из $\tilde{u} = \alpha\tilde{x} + \gamma\tilde{y} + u_0$ и $\tilde{v} = \beta\tilde{y} + v_0$ мы имеем:

$$\tilde{u} = u + (u - u_0) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2], \quad (10)$$

$$\tilde{v} = v + (v - v_0) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2]. \quad (11)$$

Для оценки радиального искажения предположим, что коэффициенты радиального искажения малы и можно оценить остальные пять внутренних параметров камеры просто пренебрегая искажением. Один из подходов заключается в том, чтобы оценить k_1 и k_2 после того, как оценены остальные параметры, что даст нам идеальные координаты пикселей (u, v) . Тогда из (10) и (11), мы имеем два уравнения для каждой точки на каждом изображении:

Для m точек на n изображениях, мы получим систему из $2mn$ уравне-

$$\begin{bmatrix} (u-u_0)(x^2+y^2) & (u-u_0)(x^2+y^2)^2 \\ (v-v_0)(x^2+y^2) & (v-v_0)(x^2+y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}-u \\ \tilde{v}-v \end{bmatrix}$$

ний, или в матричной форме $Dk = d$, где $k = [k_1, k_2]^T$. Линейное решение наименьших квадратов представляется как:

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d. \quad (12)$$

Как только k_1 и k_2 оценены, можно улучшить оценку остальных параметров, решая (9) и заменив $m'(A, R_i, t_i, M_j)$ на (10) и (11). Можно повторять эти процедуры до тех пор пока не получим приемлемое решение.

Полная оценка параметров камеры может быть проведена методом максимального правдоподобия. Очевидным расширением к (9) является оценка полного набора параметров камеры путем минимизации следующего функционала:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - m'(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j) \|^2 \quad (13)$$

где $m'(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ – это проекция точки M_j на изображении i согласно (1), на которую затем накладывается искажение в соответствии с (10) и (11). Эта проблема нелинейной минимизации решается с помощью алгоритма Левенберга-Маркуардта. Начальные предположения относи-

тельно A и R_i можно сделать также, как это было сделано ранее. Начальные предположения об k_1 и k_2 можно принять равными 0. На данном этапе мы получим улучшенную оценку матрицы перспективной проекции, в которой учтено радиальное искажение линзы.

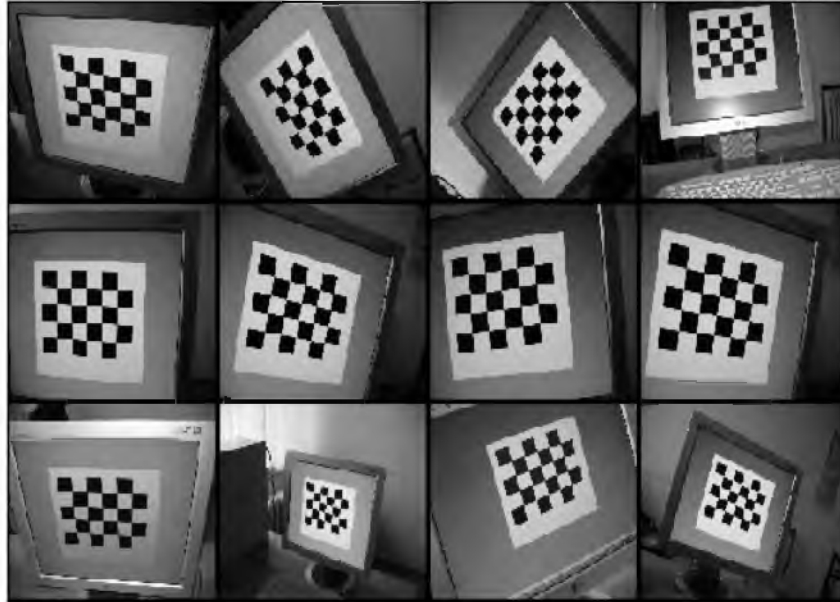


Рис. 4 Изображения использованного калибровочного шаблона

Итак, калибровку камеры можно представить следующими этапами:

1. Распечатать шаблон и расположить его на плоской поверхности;
2. Сделать несколько снимков калибровочного шаблона под разными ракурсами, передвигая плоскость или камеру.
3. Определить опорные точки на изображениях.
4. Оценить пять внутренних параметров и все внешние с помощью решения в замкнутой форме, как это было описано.
5. Оценить коэффициенты радиального искажения, решая систему уравнений (12) методом наименьших квадратов.
6. Минимизируя (13), улучшить все параметры.

Исследуемая в нашем случае камера имела следующие характеристики: $\alpha = 2964.525$; $\beta = 2633.302$; $\gamma = 90^\circ$; $u_0 = 1304.449$; $v_0 = 1063.885$; $k_1 = 0.059$; $k_2 = -1.422$. Угол обзора фотоаппарата по горизонтали - $50^\circ 36'$, по вертикали - $39^\circ 15'$. Разрешение изображения - 2272×1704 .

Калибровочный шаблон представлял собой изображение шахматной доски содержащей $4 \times 5 = 20$ угловых точек, как показано на рис. 4. Размер клетки 20×20 мм.

В ходе экспериментов было установлено, что цифровая камера Canon PowerShot A80 удовлетворяет требованиям установленными СТБ ГОСТ Р 51266 -2003: погрешность измерения линейных размеров ± 1 мм, угловых размеров ± 0.5 .