

УДК 004.932.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТАЛОННОГО ОБЪЕКТА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

© Д. А. Михайленко

*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: dmmikhajlenko@yandex.ru*

Проведено сравнение максимальной дальности обнаружения внутренних углов квадратов шахматной доски различными алгоритмами поиска угловых пикселей. Определены требования к минимальному размеру стороны квадрата для обнаружения внутренних углов шахматной доски. Предложены формулы расчёта определения максимального расстояния до шахматной доски известного размера и наименьшего обнаруживаемого размера шахматной доски для заданного расстояния.

*Ключевые слова:* обнаружение объекта, калибровка, фотограмметрия, проективная геометрия, компьютерное зрение.

DOI: 10.15372/AUT20230203

**Введение.** В компьютерном зрении большое значение имеет задача определения пространственного положения объектов, находящихся в поле зрения одиночной неподвижной камеры. Одним из широко распространённых способов её решения является использование объекта с известными размерами (эталона) для определения размеров целевого объекта и последующего установления его положения относительно камеры. Этот подход применяется в задачах калибровки камеры [1, 2], управления сервоприводом [3], визуальной навигации робота [4] и в визуальной метрологии [5]. Кроме того, такой подход используется в задаче восстановления трёхмерной модели земной поверхности по аэрофотоснимкам [6].

Данный подход осложнён тем, что неизвестно максимально допустимое удаление эталонного изображения от объектива камеры, на котором возможно его корректное распознавание соответствующими алгоритмами. Из-за этого оптимальный размер эталонного изображения для каждого конкретного случая приходится подбирать опытным путём.

Самым простым и удобным эталонным изображением является шахматная доска, чья чётко структурированная геометрия и высокая контрастность позволяют легко обнаруживать её на снимке и определять относительное положение.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является установление зависимости между размерами шахматной доски и максимальным расстоянием, на котором всё ещё возможно её определение различными алгоритмами обнаружения.

Для достижения поставленной цели выполнялось сравнение различных алгоритмов определения внутренних углов эталона. Критерием сравнения было максимальное расстояние определения внутренних углов объекта. Рассматривались случаи ортогонального расположения объекта относительно оптической оси камеры, а также случаи, когда горизонтальная ось симметрии объекта расположена под углом к оптической оси камеры. Исходя из полученных данных, рассчитывались минимальные размеры клетки объекта в пикселях, для которых возможно обнаружение внутренних углов.

**Алгоритмы обнаружения.** Для сравнения при калибровке камер применялись три алгоритма поиска угловых пикселей [7–9].

Алгоритм `findChessboardCorners` сначала «проверяет» наличие объекта на изображении с помощью последовательного применения морфологических операций сужения и

расширения. Затем, если искомый объект был обнаружен, изображение конвертируют в чёрно-белое. После конвертации применяется морфологическая операция расширения (dilation) и извлекаются контуры квадратов [7].

Алгоритм `findChessboardCornersCB` использует локализованное преобразование Радо-на, аппроксимированное коробчатыми фильтрами. В [8] показано, что данный алгоритм устойчив к различным видам шума, имеет высокую производительность и способен находить координаты угловых пикселей с субпиксельной точностью.

В [9] предложен подход `CBDETECT` для обнаружения углов клеток объекта. Сначала производится фильтрация входного изображения. Авторы используют два вида фильтров: один даёт больший отклик для «+»-образных сочленений клеток, а другой — больший отклик для «х»-образных сочленений. Каждый фильтр состоит из четырёх свёрточных фильтров  $\{A, B, C, D\}$ . В идеальном случае отклик для фильтров  $\{A, B\}$  должен быть больше среднего отклика для фильтров  $\{A, B, C, D\}$ , а отклик фильтров  $\{C, D\}$  — соответственно меньше. Затем к полученному набору значений функции правдоподобия применяется подавление немаксимумов (conservative non-maxima-suppression) и проверка угловых пикселей по распределению их градиента.

В описанных выше алгоритмах внутренний угол объекта рассматривается как крестообразная конфигурация из двух чёрных и двух белых квадратов. Минимально возможный размер подобной конфигурации состоит всего из четырёх пикселей (соприкосновение углов двух чёрных квадратов на фоне двух белых). Такая конфигурация соответствует максимально возможному удалению шахматной доски от объектива камеры, при котором каждая её клетка соответствует только одному пикселу изображения. Очевидно, что алгоритм, способный к определению таких конфигураций будет обладать излишне высокой чувствительностью к шумам, следовательно, будет приводить к ложным срабатываниям. Таким образом, максимальное расстояние обнаружения всех внутренних углов объекта алгоритмом ограничивается некоторым минимально допустимым пиксельным размером стороны одного квадрата «х»-образной конфигурации  $2 \times 2$ .

**Описание эксперимента.** Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование:

- камера Intel Real Sense D435i с фокусным расстоянием 1,88 мм, размером пикселя  $1,4 \times 1,4$  мкм (съёмка проводилась с разрешением изображения  $1920 \times 1080$  и глубиной цвета 24 бит);
- лазерный дальномер Milesee X5 с погрешностью  $\pm 2$  мм;
- объекты с квадратами  $4 \times 4$  (девять внутренних углов) и размером стороны клетки 25, 38 и 48 мм.

Для сравнения алгоритмов обнаружения внутренних углов клеток шахматной доски был подготовлен массив из трёх серий по 15 наборов изображений. Каждая серия соответствует одному из использованных в работе объектов. Каждый набор серии соответствует определённому расстоянию от 1 до 15 м с шагом 1 м от объектива камеры. Дистанция до каждого изображения измерялась с помощью лазерного дальномера. В один набор входит 4 фотографии объекта, расположенного в окрестности главной точки снимка под углами  $0, 30, 45$  и  $60^\circ$  к картинной плоскости. Главной точкой снимка является место пересечения картинной плоскости и главной оси камеры. Пример одного такого набора изображён на рис. 1 [10].

В полученном массиве с помощью вышеописанных алгоритмов был произведён поиск внутренних углов объектов. Обнаружение считалось успешным, если все девять внутренних углов на изображении были установлены верно, и неуспешным, если было найдено менее 9 углов либо положение определённых углов не соответствовало реальному. Для



Рис. 1. Пример набора снимков объекта со стороной квадрата 48 мм на расстоянии 5 м под углами 0 (a), 30 (b), 45 (c) и 60° (d) к картинной плоскости

каждого из четырёх положений объекта на снимке была отмечена наибольшая последовательность непрерывных успешных определений внутренних углов. Снимок, соответствующий наибольшему удалению объекта от камеры в полученной последовательности, является максимальным расстоянием определения внутренних углов для заданного алгоритма. Полученные максимальные расстояния обнаружения представлены в табл. 1, знаком «-» обозначено отсутствие каких-либо успешных определений.

Используя модель камеры-обскуры и зная размер пиксела камеры и её фокусное расстояние, можно рассчитать длину стороны клетки объекта в пикселах на найденных расстояниях:

$$I_{\text{pix}} = \frac{I_{\text{real}} F_{\text{cam}}}{L P_{\text{size}}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{real}}$  — реальная длина целевого объекта;  $F_{\text{cam}}$  — длина фокуса камеры;  $L$  — удалённость целевого объекта от объектива камеры;  $P_{\text{size}}$  — размеры пиксела камеры.

В табл. 2 приведены рассчитанные по (1) длины проекций вертикальной стороны квадрата объекта на матрицу камеры в пикселах. Абсолютные погрешности вычисления пиксельных размеров проекций не превышали  $\pm 0,7$  пикс, величина выбросов не превышала  $\pm 2$  пикс.

Из табл. 2 следует, что с увеличением угла поворота длины вертикальных сторон клеток в пикселах также увеличиваются. Однако при сопоставлении табл. 1 и 2 следует, что этот рост обусловлен уменьшением максимального расстояния обнаружения. Это следствие того, что поворот объекта производился только по вертикальной оси, что почти не влияет на длины вертикальных сторон клеток на изображении, но существенно уменьшает длину горизонтальных сторон. Так, пиксельная длина вертикальной стороны клетки размером 48 мм доски  $4 \times 4$  на расстоянии 8 м, рассчитанная по (1), составляет 8,05 пикс. При близости угла поворота к  $90^\circ$ , когда горизонтальная ось объекта почти совпадает с главной осью камеры, самая дальняя от объектива камеры вертикальная линия будет находиться на расстоянии 8,19 м, а её длина составит 7,87 пикс. В этом случае

Таблица 1

**Максимальное расстояние обнаружения объекта алгоритмами**

Угол, °	CBDet, м	CV_SB, м	CV, м
Сторона квадрата 25 мм			
0	5,008	7,006	4,005
30	4,005	5,993	1,003
45	4,005	5,993	—
60	2,008	3,006	—
Сторона квадрата 38 мм			
0	8	12,003	8
30	7,001	9	8
45	6,006	7,001	6,006
60	1,003	6,006	6,006
Сторона квадрата 48 мм			
0	10,006	13,007	10,006
30	9,006	12,008	10,006
45	8,005	9,006	7,002
60	5,001	7,002	7,002

Таблица 2

**Длины проекций вертикальной стороны квадрата объекта на матрицу камеры при максимальном расстоянии обнаружения**

Угол, °	CBDet, пикс	CV_SB, пикс	CV, пикс
Сторона квадрата 25 мм			
0	6,70	4,79	8,38
30	8,38	5,60	33,47
45	8,38	5,60	—
60	16,72	11,17	—
Сторона квадрата 38 мм			
0	6,38	4,25	6,38
30	7,28	5,67	6,38
45	8,49	7,28	8,49
60	50,87	8,49	8,49
Сторона квадрата 48 мм			
0	6,44	4,95	6,44
30	7,15	5,37	6,44
45	8,05	7,16	9,20
60	12,88	9,20	9,20

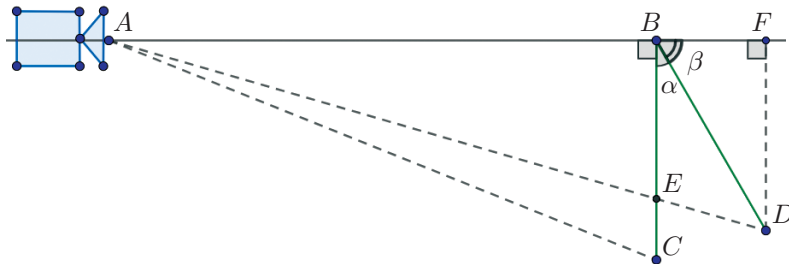


Рис. 2. Схема проекций горизонтальных линий объекта при ортогональном расположении ( $BC$ ) и при повороте на угол  $\alpha$  ( $BD$ )

различие в длинах вертикальных линий будет менее 5 %. В то же время длины проекций горизонтальных сторон будут стремиться к 0 при стремлении угла поворота к  $90^\circ$  (рис. 2).

Отсюда следует, что возможности алгоритма к обнаружению внутренних углов объекта в условиях данного эксперимента в большей степени определяются длинами горизонтальных сторон, поскольку их проекции меньше, чем проекции вертикальных сторон.

Примем, что  $AF$  — оптическая ось камеры,  $BC$  — положение клетки объекта по нормали к оптической оси камеры,  $BD$  — положение клетки после поворота на заданный угол  $\alpha$  вокруг вертикальной оси доски,  $AB$  — расстояние от объектива камеры до шахматной доски. Тогда согласно рис. 2

$$\triangle BAE \sim \triangle FAD \Rightarrow \frac{BE}{DF} = \frac{AB}{AF} = \frac{AB}{AB + BF}.$$

При этом

$$BF = BD \cos \beta, \quad DF = BD \sin \beta, \quad \beta = 90^\circ - \alpha.$$

Отсюда длины горизонтальных сторон квадратов объекта могут быть рассчитаны как

$$BE = \frac{ABBD \sin \beta}{AB + BD \cos \beta}. \quad (2)$$

Определив линейные длины проекций горизонтальных сторон квадратов на матрицу камеры, можно рассчитать их пиксельные длины по (1). Результаты расчёта представлены в табл. 3.

Здесь CV — алгоритм findChessboardCorners, CV\_SB — алгоритм findChessboardCornersCB, CBDet — алгоритм CBDETECT.

В табл. 3 приведены только длины горизонтальных сторон объекта, расположенного под углами  $30, 45, 60^\circ$  к оптической оси камеры, так как при расположении объекта ортогонально клетки объекта являются квадратами, а значит, длины горизонтальных и вертикальных сторон объекта в пикселах будут равны. Расчётные значения горизонтальных сторон квадратов объекта в пикселах под углами  $0, 30, 45, 60^\circ$  на максимальных расстояниях обнаружения показаны на рис. 3–5.

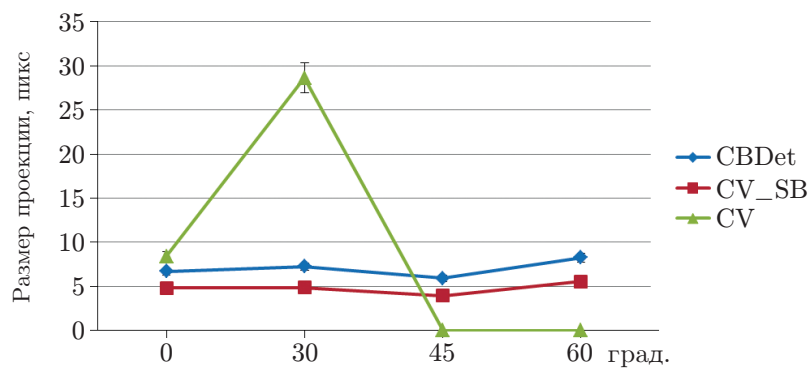
Согласно графикам на рис. 3–5 на максимальных дистанциях обнаружения длина наименьшей горизонтальной проекции стороны одной клетки объекта на матрицу камеры составляет 5 пикс для алгоритма findChessboardCornersCB и 6 пикс для алгоритмов findChessboardCorners и CBDETECT соответственно.

На рис. 3 значения проекций для алгоритма findChessboardCorners обусловлены небольшим для данного алгоритма размером объекта. Шаг дистанции 20 см, вероятно,

Таблица 3

**Длины проекций горизонтальной стороны квадрата объекта  
при максимальном расстоянии обнаружения**

Угол, °	CBDet, пикс	CV_SB, пикс	CV, пикс
Сторона квадрата 25 мм			
30	7,23	4,84	28,62
45	5,90	3,94	—
60	8,27	5,54	—
Сторона квадрата 38 мм			
30	6,29	4,89	5,51
45	5,98	5,13	5,98
60	24,62	4,22	4,22
Сторона квадрата 48 мм			
30	6,18	4,63	5,56
45	5,66	5,04	6,47
60	6,39	4,57	4,57



*Рис. 3.* Пиксельные размеры проекций горизонтальной стороны клетки 25 мм под углами 0, 30, 45, 60° к картинной плоскости

позволил бы точнее определить минимальный размер проекции клетки (25 мм) при углах поворота 45 и 60° для этого алгоритма. Следует отметить, что алгоритм CBDETECT, который показал схожие с findChessboardCorners возможности по обнаружению внутренних углов объекта для размеров клеток 38 и 48 мм, не испытывал подобных проблем с объектом со стороной клетки 25 мм. Возможно, и без того непростая задача поиска небольшого объекта осложнилась особенностями реализации алгоритма findChessboardCorners, который ищет готовые квадраты, в то время как алгоритмы findChessboardCornersCB и CBDETECT настроены на поиск «х»-образных соединений вершин квадратов. Значительный выброс в результатах работы алгоритма CBDETECT на рис. 4, вероятно, также обусловлен особенностями его реализации, поскольку при повороте объекта на 60° вертикальные линии сторон квадратов больше соответствуют фильтру «+»-образных сочленений, а горизонтальные — фильтру «х»-образных сочленений. На той же серии изображений для угла поворота 60° алгоритмы findChessboardCorners и findChessboardCornersCB определили внутренние углы объекта на значительно большей дистанции. Отметим, что сравнение работы алгоритмов принципиально проводилось по одним и тем же снимкам.

Из формул (1) и (2) получены формула расчёта максимального расстояния обнаружения внутренних углов объекта известных размеров и формула расчёта минимального

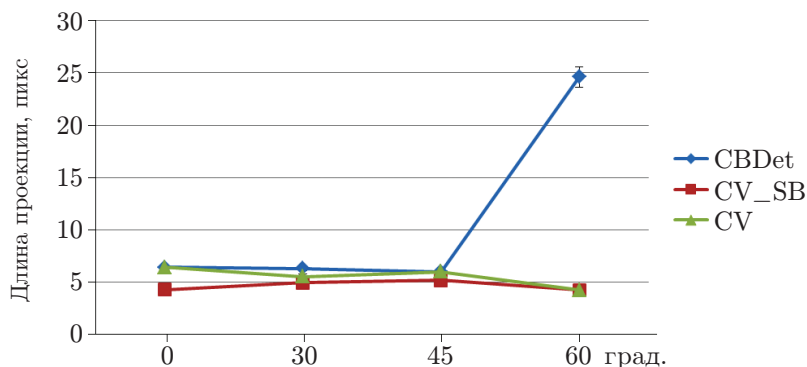


Рис. 4. Пиксельные размеры проекций горизонтальной стороны клетки 38 мм под углами 0, 30, 45, 60° к картинной плоскости

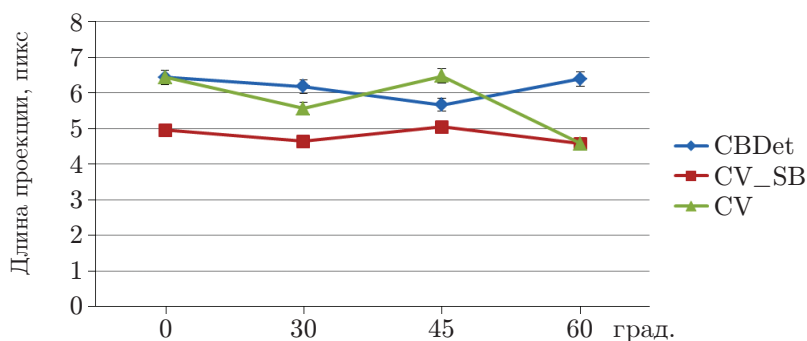


Рис. 5. Пиксельные размеры проекций горизонтальной стороны клетки 48 мм под углами 0, 30, 45, 60° к картинной плоскости

размера обнаружения объекта для заданного расстояния:

$$L = I_{\text{real}} \left( \frac{F_{\text{cam}} \sin(90^\circ - \alpha)}{I_{\text{pix}} P_{\text{size}}} - \cos(90^\circ - \alpha) \right), \quad (3)$$

$$I_{\text{real}} = \frac{L I_{\text{pix}} P_{\text{size}}}{F_{\text{cam}} \sin(90^\circ - \alpha) - I_{\text{pix}} P_{\text{size}} \cos(90^\circ - \alpha)}. \quad (4)$$

Максимальные расчётные расстояния детектирования объекта со стороной клетки 48 мм, полученные по (3) для алгоритма findChessboardCornersCB: 12,89 м для расположения объекта в картинной плоскости, 11,14 м при расположении объекта под углом 30°, 9,08 м под углом 45° и 6,4 м под углом 60°.

**Заключение.** В данной работе проведено сравнение максимальной дальности обнаружения внутренних углов квадратов шахматной доски алгоритмами поиска угловых пикселей различными алгоритмами. Определены требования к минимальному размеру стороны квадрата доски в пикселях, необходимому для обнаружения внутренних углов объекта. Наибольшую чувствительность показал алгоритм findChessboardCornersCB — ему требуется от 5 пикс на сторону квадрата, в то время как остальным алгоритмам требуется от 6 пикс. Это даёт ему значительный прирост в максимальном расстоянии детектирования: так, для объекта со стороной клетки 25 мм прирост составил ~75 %, для объекта со стороной клетки 48 мм — до 30 %.

Предложены формулы расчёта максимального расстояния определения объекта известного размера и расчёта наименьшего обнаруживаемого размера объекта на заданном

расстоянии, позволяющие сократить этап подбора размера калибровочной таблицы, что заметно упрощает планирование фотограмметрических измерений для одиночной камеры с использованием указанных выше алгоритмов. Так, если требуется провести измерения в комнате размерами  $6 \times 8$  м, используя камеру с фокусным расстоянием 1,88 мм и размером пиксела  $1,4 \times 1,4$  мкм, то для алгоритма findChessboardCornersCB достаточно объекта с размером клетки 29 мм при его ортогональном расположении к главной оси камеры. В качестве минимально допустимых значений для обнаружения размера проекции стороны клетки объекта рекомендуется использовать 5 пикс для алгоритма findChessboardCornersCB и 6 пикс для алгоритмов findChessboardCorners и CBDETECT.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-37-90076).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wang Y. M., Li Y., Zheng J. B.** A camera calibration technique based on OpenCV // Proc. of the 3rd Int. Conf. on Information Sciences and Interaction Sciences. Chengdu, China, 23-25 June, 2010. DOI: 10.1109/iciis.2010.5534797.
2. **Marchand E., Chaumette F.** A New Formulation for Non-Linear Camera Calibration Using Virtual Visual Servoing. [Research Report] RR-4096, INRIA. 2001. inria-00072535.
3. **Olson E.** AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Shanghai, China, 09-13 May, 2011. P. 3400–3407. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979561.
4. **Першина Ж. С., Каздорф С. Я., Лопота А. В.** Методы визуальной навигации мобильного робота и построения картографических моделей внешней среды // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 92–102. DOI: 10.15372/AUT20190210.
5. **Shortis M. R., Robson S., Jones T. W., Lunsford C. B.** Parachute model validation using image sequences. Optical 3-D Measurement Techniques VIII, I. 2007. P. 72–79.
6. **Tonkin T. N., Midgley N. G.** Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry // Remote Sens. 2016. **8**, Iss. 786. DOI: 10.3390/rs8090786.
7. **Suzuki S., Abe K.** Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Comput. Vis., Graph. and Image Process. 1985. **30**, Iss. 1. P. 32–46,
8. **Duda A., Frese U.** Accurate detection and localization of checkerboard corners for calibration // Proc. of the 29th British Machine Vision Conference (BMVC-29). Newcastle, United Kingdom, 3-6 Sept., 2018. 10 p.
9. **Fedorov I., Lawal N., Thornberg B. et al.** Towards calibration of outdoor multi-camera visual monitoring system // Proc. of the 12th Int. Conf. on Distributed Smart Cameras. Eindhoven, Netherlands, 3-4 Sept., 2018. Article N 17. P. 1–6. DOI: 10.1145/3243394.3243695.

*Поступила в редакцию 04.05.2022*

*После доработки 04.11.2022*

*Принята к публикации 29.12.2022*