

Трансформация изображений, формируемых сверхширокоугольными объективами

В. А. Гришин, Н. А. Строилов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vgrishin@cosmos.ru*

В различных прикладных областях (системы навигации, видеорегистраторы, системы наблюдения и т. п.) находят применение камеры с широкоугольными или сверхширокоугольными объективами. Такие камеры позволяют получить изображение в широком угле обзора. Однако для визуального анализа полученные снимки не всегда пригодны из-за наличия значительных геометрических искажений. По этой причине изображения подвергают специальной коррекции (трансформации) для уменьшения искажений. Ситуация ещё более усложняется, если снимки со сверхширокоугольных камер необходимо использовать для решения задач распознавания и/или измерения. При этом во многих случаях целесообразно трансформировать изображения, полученные с таких камер, к обычной модели центральной проекции. В процессе такой трансформации возникает необходимость применения интерполяции яркости по неравномерной сетке отсчётов. Интерполяция необходима потому, что в процессе коррекции геометрических искажений сетка отсчётов исходного изображения становится разреженной и не образует плотного покрытия на плоскости, куда проектируется преобразованное изображение, что и приводит к необходимости использования интерполяции яркости. Хотя после таких преобразований изображение визуально воспринимается как не имеющее дефектов, однако на самом деле его качество ухудшается, что может весьма неблагоприятно отразиться на работе алгоритмов распознавания и/или измерения. В статье на конкретном примере показано, сколь значительными могут быть искажения яркости изображений при таком преобразовании.

Ключевые слова: сверхширокоугольные объективы, объективы fish-eye, трансформация изображений, искажения при интерполяции изображений

Одобрена к печати: 04.07.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-45-59

Введение

В настоящее время наблюдается быстрый рост применения камер с широкоугольными и сверхширокоугольными объективами в самых различных областях. Такие камеры позволяют существенно расширить область пространства, для которого формируется изображение. В частности, всё более широкое распространение получают так называемые сферические камеры, или, как их ещё называют, панорамные 360-градусные камеры, которые могут содержать от двух камер с сверхширокоугольными объективами до нескольких десятков камер с обычными объективами. Сферическая камера может использоваться как мобильный видеорегистратор, снимающий всё происходящее вокруг, или как составная часть различных систем: управления, наблюдения для контроля безопасности, мониторинга ситуации, документирования состояния окружающей обстановки и т. д.

Однако решение таких задач, как распознавание объектов, а также задач измерения ориентируется в первую очередь на изображения, принцип формирования которых соответствует классической модели центральной проекции (*англ.* pinhole). Причина этого заключается в том, что указанная модель весьма проста и достаточно хорошо описывает реальные объективы при не слишком больших углах поля зрения. При этом незначительные отклонения от данной простой модели могут быть прокалиброваны и учтены в процессе обработки изображений. Проблемы возникают при использовании объективов с большим и очень большим полем зрения, к которым, в частности, относятся и так называемые объективы «рыбий глаз» (*англ.* fish-eye), размер поля зрения которых может превышать 180°.

Сверхширокоугольные объективы могут применяться и в задачах навигации, в частности для определения местной вертикали по изображению линии горизонта. В сочетании со звёздными датчиками либо камерами, определяющими направление на Солнце, Луну или планеты Солнечной системы, реализуется задача навигации космических аппаратов или иных мобильных объектов.

Можно сказать, что проблемы, связанные с искажениями при увеличении углов поля зрения, носят фундаментальный характер и связаны с тем, что изображение наблюдаемых объектов проектируется на плоскость светочувствительного датчика, а не на сферическую поверхность. Данная проблема может решаться двумя путями. Во-первых, разработкой специальной оптики, обеспечивающей минимум искажений при широком поле зрения. Пример такого подхода — продукция американской фирмы Theia Technologies (<https://www.theiatech.com/lenses/ultra-wide-angle-no-distortion-lenses/>). Согласно материалам компании, их объективы обеспечивают приемлемый уровень искажений до размера поля зрения в 135° . Снижение геометрических искажений обусловлено применением специального типа линз (Iñiguez, 2014; Peterson, 2008).

Второй путь — компенсация искажений преобразованием самого изображения. В принципе, можно вносить «предыскажения» в эталонное изображение объекта, которое используется для распознавания/измерения. Это возможно, например, для точечных объектов (в частности, звёзд) и тех объектов, которые могут условно считаться точечными, когда при проецировании на плоскость меняется главным образом соотношение между направлением на визируемые звёзды и соответствующим расстоянием на плоскости матрицы фотоприёмника. Для протяжённых объектов целесообразно корректировать искажённое изображение, а не трансформировать (предыскажать) эталон. В этом случае проблема коррекции искажений сводится к пересчёту яркости от одной сетки отсчётов к другой. В качестве примера коррекции изображений, полученных всенаправленными камерами, можно привести работу (Лазаренко и др., 2015). Необходимо отметить два важных обстоятельства. Во-первых, компенсация искажений осуществляется только для поля зрения, существенно меньшего, чем 180° , поскольку в противном случае качество изображений, получающихся после компенсации, существенно ухудшается. Во-вторых, для решения таких специфических задач, как, например, измерения по линии горизонта, необходимо работать с исходным изображением, используя точную модель сверхширокоугольной камеры.

Анализ искажений яркости при трансформации изображения к модели pinhole

В общем случае каждый пиксель сформированного изображения становится результатом интегрального преобразования яркости наблюдаемого изображения в некотором телесном угле с учётом функции рассеяния точки конкретного объектива, угла визирования, расстояния, геометрических и яркостных искажений объектива. При этом точный переход от сетки пикселей объектива fish-eye к сетке пикселей для модели pinhole достаточно сложен в вычислительном плане, а самое главное — он требует точного знания всех указанных факторов и моделей. Далее здесь будет рассматриваться существенно более простой случай, когда яркость каждого пикселя условно относится к яркости точки в его центре.

Центральная часть изображения камеры со сверхширокоугольным объективом может быть использована как дополнительный источник навигационной информации по изображению подстилающей поверхности Земли. Получаемые таким образом изображения имеют невысокое разрешение по кадру. Также сверхширокоугольные объективы могут применяться для ближней относительной навигации на малых и сверхмалых расстояниях при решении задач стыковки с космическими аппаратами.

В двух последних случаях возникают вопросы, связанные с точностью калибровки камер и возможностью коррекции геометрических искажений сверхширокоугольных камер с целью приведения изображений с таких камер к виду, формируемому обычными камерами (исполь-

зующими обычную pinhole модель центральной проекции). Это важно для решения двух взаимосвязанных процессов, а именно распознавания и измерения.

Для приведения изображений, формируемых сверхширокоугольными камерами, к модели центральной проекции требуется решить две задачи. Во-первых, необходимо выполнить коррекцию геометрических искажений, свойственных сверхширокоугольным камерам. Это важно для проведения точных измерений геометрических размеров наблюдаемых объектов и расстояний до них. Этой задачи мы в настоящей статье касаться не будем. Далее будем полагать, что данная задача уже решена путём съёмок объектов с точно известными геометрическими размерами, определением параметров формул перехода к соответствующей системе координат, используемой в проективной модели. Считаем также, что эти операции выполнены с достаточной точностью, что позволяет удовлетворительно решать задачи измерений.

Во-вторых, необходимо пересчитать яркость элементов изображения, переходя от неравномерной сетки отсчётов к равномерной. То есть требуется сделать интерполяцию яркости. Можно отметить, что теоретически для точечных объектов (например, звёзд) интерполяция не нужна, поскольку погрешность направления на звезду можно учесть поправками по координатам. Ошибки направления могут возникать, например, из-за асимметрии функции рассеяния точки, которая определяется свойствами объектива fish-eye. При этом локальные искажения геометрии в малой окрестности направления на звезду могут быть достаточно малыми.

Если же брать квазиточечный объект, например объект, эталонное изображение которого представлено его особыми точками с дескрипторами, которые формируются по окрестности направления на особые точки и достаточно чувствительны к геометрическим искажениям окрестностей, то в этом случае уже необходим переход к равномерной сетке, для чего и используется интерполяция отсчётов.

Остановимся на практически важной задаче распознавания и локализации заданных фрагментов изображения. Это могут быть как эталонные изображения заданных объектов, так и окрестности множества информативных точек, совокупность которых и формирует образ (эталонное изображение) искомого объекта. Для решения задачи распознавания и локализации важно сохранение локальной структуры изображения искомого объекта или локальной структуры информативных точек. Остановимся на этом более подробно. Проблема в том, что модель центральной проекции (модель pinhole) применима при не слишком широком поле зрения. Соответственно, если в сверхширокоугольной камере используется светочувствительная матрица размером 2048×2048 пикселей и поле зрения составляет 180° или чуть более, то при преобразовании изображения к проективной модели с матрицей того же размера преобразованное изображение будет содержать значительно меньше информации, чем исходное, полученное сверхширокоугольной камерой. И это происходит при том, что и само исходное изображение, полученное от сверхширокоугольной камеры, содержит информацию о числе пикселей, значительно меньшем, чем 2048×2048 , поскольку углы матрицы не участвуют в формировании изображения.

Далее будем предполагать, что исходное изображение, формируемое сверхширокоугольной камерой, и преобразованное (трансформированное) изображение *согласованы*, т. е. центральная часть исходного изображения отображается в центральную часть преобразованного изображения без потерь, *пиксель в пиксель*.

Рассмотрим исходный снимок, полученный от сверхширокоугольной камеры, представленный на *рис. 1а* (см. с. 48). Изображение имеет размер 2048×2048 пикселей. Первоначально данное изображение использовалось для калибровки камеры и определения параметров трансформации углов визирования точек пространства в систему координат, связанную с матрицей камеры. Поэтому на нём видны специальные маркеры для калибровки камеры. Далее будем работать только с маркерами, расположенными на противоположной стене, а именно с 15 маркерами, имеющими номера 24, 25, 26, 12, 13, 15, 08, 07, 16, 14, 10, 17, 19, 18, 04. Были обработаны восемь снимков, полученных при небольших разворотах оси камеры в пространстве. При этом положение маркеров смещалось в кадре. Указанные маркеры использованы для оценки степени ухудшения параметров их обнаружения и локализации при интерполяции.

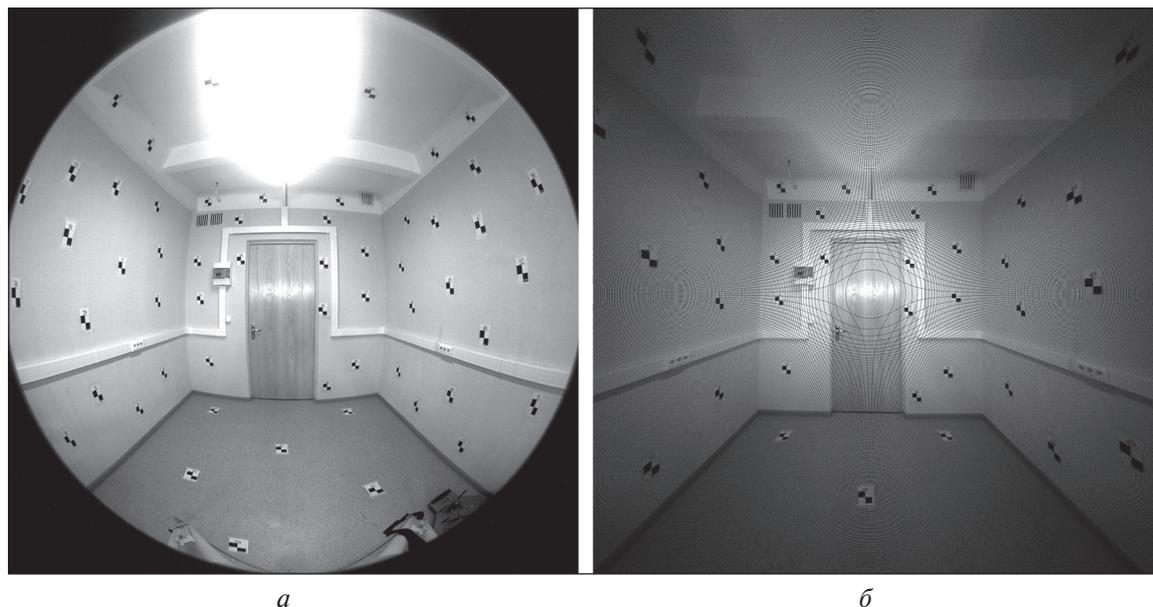


Рис. 1. Исходное изображение (а); изображение, полученное после коррекции геометрических искажений (б), — видна сложная сеть чёрных пикселей, в которых яркость трансформированного изображения не определена

На рис. 1б показана картинка, которая получается после трансформации левого изображения в систему координат, связанную с матрицей камеры. Изображение также имеет размер 2048×2048 пикселей. Трансформация производится на основе модели центральной проекции с коррекцией геометрических искажений. Поле зрения преобразованного изображения приблизительно соответствует $\pm 51^\circ$. На изображении хорошо заметен достаточно сложный муаровый узор, который возникает при наложении двух растров, а именно раstra исходной сверхширокоугольной картинке и прямоугольного раstra преобразованного изображения. Чёрные точки муарового узора показывают те пиксели преобразованного изображения, яркость которых не определена после преобразования. Яркость этих пикселей необходимо определить путём интерполяции. Можно отметить, что визуально яркость изображения на рис. 1б кажется существенно меньше, чем изображения на рис. 1а. Это происходит из-за того, что на рис. 1б присутствует много чёрных точек (на которых яркость не определена), а глаз человека реагирует на среднюю яркость. Пример изображения, полученного интерполяцией яркости тех пикселей, значения яркости которых не были определены после трансформации изображения, приведён на рис. 2 (см. с. 49). Здесь яркость изображения на рис. 2 кажется больше, чем яркость изображения рис. 1а, поскольку на рис. 1а присутствуют чёрные углы.

В данном случае 62,4 % пикселей исходного изображения (см. рис. 1а) не попадают в кадр преобразованного изображения (см. рис. 1б и 2). То есть для данных снимков реально может быть использована информация только о 37,6 % пикселей исходного изображения. Были сделаны расчёты количества пикселей, яркость которых должна интерполироваться для окрестности размером 21×21 пиксель в зависимости от расстояния от центра кадра, выраженного также в пикселях (рис. 3а, см. с. 49). На рис. 3б показан начальный участок этого графика в более крупном масштабе. На обоих графиках представлена верхняя и нижняя граница разброса числа таких пикселей.

Графики показывают, что даже для небольших расстояний от центра кадра количество точек, яркость которых необходимо интерполировать, достигает значительных величин — сотен пикселей. В таблице приведены данные по количеству пикселей, которые необходимо интерполировать для указанных ранее 15 маркеров. Для каждого маркера рассматривалась окрестность размером 21×21 пиксель, содержащая 441 пиксель. Поскольку положение каждого маркера в кадре для восьми снимков несколько различается, то приведено минимальное и максимальное значение.



Рис. 2. Результат интерполяции яркости пикселей преобразованного изображения

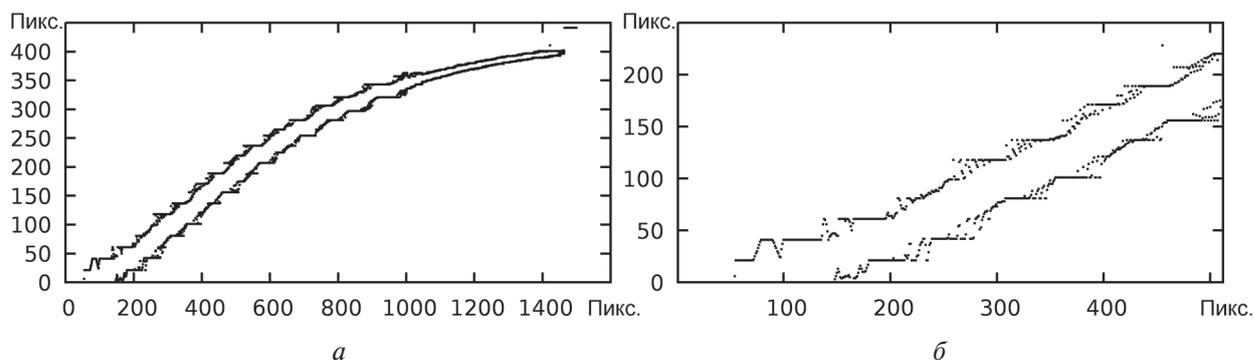


Рис. 3. Количество пикселей, яркость которых необходимо интерполировать (ось ординат), в зависимости от расстояния до центра кадра (ось абсцисс) (а); начальный участок этого графика (б). Отмечены границы разброса — минимальное и максимальное значение числа пикселей

Анализ таблицы показывает, что даже при использовании только центральной части изображения, полученного трансформацией снимка, сформированного камерой fish-eye (см. рис. 2), количество точек, для которых необходимо делать интерполяцию яркости, может превышать 50 %.

Большое количество точек, яркость которых необходимо интерполировать, порождает закономерный вопрос о степени влияния такой интерполяции на решение задач поиска, обнаружения и распознавания заданных элементов изображения (например, особых точек). В задачах обработки изображений широко используются различные методы интерполяции

яркости. Однако в подавляющем большинстве случаев применяемые методы предназначены для работы на регулярных сетках отсчётов яркости. В нашем же случае необходимо использовать методы интерполяции, предназначенные для работы по неравномерным сеткам отсчётов. И такая интерполяция требует существенно более сложных алгоритмов и больших вычислительных затрат, чем интерполяция по равномерным сеткам отсчётов.

Количество точек окрестности размером 21×21 пиксель, для которых требуется интерполяция

| Номер точки по порядку | Номер маркера на изображении | Количество точек окрестности, подлежащих интерполяции | | Доля точек окрестности, подлежащих интерполяции, % | |
|------------------------|------------------------------|---|----------|--|----------|
| | | минимум | максимум | минимум | максимум |
| 1 | 24 | 123 | 199 | 27,9 | 45,1 |
| 2 | 25 | 101 | 143 | 22,9 | 32,4 |
| 3 | 26 | 153 | 233 | 34,7 | 52,8 |
| 4 | 12 | 59 | 122 | 13,4 | 27,7 |
| 5 | 13 | 106 | 184 | 24,0 | 41,7 |
| 6 | 15 | 28 | 141 | 6,3 | 32,0 |
| 7 | 08 | 0 | 58 | 0,0 | 13,2 |
| 8 | 07 | 27 | 132 | 6,1 | 29,9 |
| 9 | 16 | 109 | 235 | 24,7 | 53,3 |
| 10 | 14 | 8 | 118 | 1,8 | 26,8 |
| 11 | 10 | 21 | 124 | 4,8 | 28,1 |
| 12 | 17 | 81 | 222 | 18,4 | 50,3 |
| 13 | 19 | 86 | 158 | 19,5 | 35,8 |
| 14 | 18 | 135 | 250 | 30,6 | 56,7 |
| 15 | 04 | 146 | 228 | 33,1 | 51,7 |

Большой опыт работы с задачами интерполяции по неравномерным сеткам отсчётов накоплен в таких прикладных областях, как геофизика и картография. В работе (Аляутдинов, Кошель, 2001) рассмотрен вопрос геометрической трансформации цифровых карт, построенных в разных проекциях. В обзоре (Franke, 1982) приведены различные методы интерполяции по набору точек. Методы были протестированы автором, что облегчает их сравнение и выбор наиболее подходящего метода из рассмотренных. Этот обзор достаточно старый, но в нём рассмотрены классические методы интерполяции по неравномерным сеткам. Обзор (Amidror, 2002) описывает результаты более поздних исследований в данном направлении.

Широкое распространение и развитие в задачах интерполяции по неравномерным сеткам получил метод Шепарда (*англ.* Shepard's Method). В нём для вычисления весов, с которыми учитывается значение интерполируемого параметра, используются различные функции «расстояния» до узлов сетки. Этот метод достаточно прост, понятен и легко реализуется. Примерами его различных модификаций могут служить работы (Basso et al., 1999; Dell'Accio, Di Tommaso, 2016; Renka, 1988).

Развиваются и другие методы. Например, в статье (Журавлев, Журавлев, 2007) рассмотрена линейная интерполяция со сглаживанием на симплексном покрытии области с произвольным распределением узлов нерегулярной сетки. В работе (Долгаль и др., 2017) предложен новый метод аппроксимации геофизических полей (например, магнитных и гравитационных) по нерегулярной сетке с использованием истокообразных функций. Метод работоспособен при высоком уровне помех измерений. В статье (Masjukov, Masjukov, 2005) представлен быстрый итеративный метод интерполяции с мультиразрешением. В работе (Vlachkova, Radev, 2022) дан сравнительный анализ методов интерполяции по неравномерным сеткам с минимальной нормой и триангуляцией поверхностей Безье.

Как правило, в рассмотренных публикациях используются достаточно сложные и трудоёмкие алгоритмы, ориентированные на небольшое количество отсчётов измеряемых геофизических полей. В нашем же случае количество отсчётов превышает 1,5 млн. В этих условиях большое значение приобретает вычислительная сложность используемых алгоритмов, поскольку в некоторых случаях изображения приходится обрабатывать в режиме реального времени.

С учётом изложенного выше для сравнения были выбраны и реализованы самые простые алгоритмы интерполяции, требующие минимальных вычислительных затрат.

1. Интерполяция нулевого порядка. Это простейший вариант интерполяции, когда яркость интерполируемого пикселя принимается яркость ближайшего пикселя с известной яркостью. Данный вариант алгоритма интерполяции обладает минимальной вычислительной сложностью и одновременно наилучшими показателями качества интерполяции.
2. Интерполяция первого порядка. Это более сложный вариант интерполяции. При использовании данного метода сначала проводился анализ ближайшей окрестности интерполируемого пикселя. А именно — выявлялись пиксели, в которых яркость определена на исходном изображении (уже интерполированные пиксели исключаются из рассмотрения). Определялась тройка ближайших пикселей, которые формируют треугольник, *охватывающий* интерполируемый пиксель. После этого рассчитывалась яркость в интерполируемом пикселе. Если в ближайшей окрестности такой тройки найти не удавалось, то использовалась интерполяция нулевого порядка.
3. Интерполяции Шепарда. Это ещё более сложный способ интерполяции. При использовании данного метода также выявлялись пиксели с известной яркостью, ближайшие к интерполируемому пикселю. Число таких пикселей ограничивалось и задавалось равным трём. Яркость интерполируемого пикселя определялась как взвешенная сумма яркостей пикселей, используемых для интерполяции. Веса яркостей определялись исходя из расстояния до этих пикселей: чем расстояние меньше, тем выше вес данного пикселя в сумме яркостей.
4. Метод радиальных базисных функций (*англ.* Radial Basis Function Method). При использовании этого метода яркость интерполируемого пикселя находится как линейная комбинация значений радиальных базисных функций. В данной реализации метода, также как и в случае линейной интерполяции, использовались три ближайших пикселя, образующих охватывающий треугольник. Однако в этом случае оптимальные весовые коэффициенты определялись из решения системы из трёх уравнений.

Следует отметить, что во всех четырёх случаях, а особенно при использовании алгоритмов 2–4, наиболее затратной в вычислительном плане оказывалась задача отбора ближайших к интерполируемому пикселю пикселей с известной яркостью, удовлетворяющих заданным геометрическим ограничениям.

Методы интерполяции сравнивались по двум показателям:

- 1) коэффициенту корреляции (коэффициент корреляции Пирсона). Хотя в настоящее время используется большое разнообразие функций сходства изображений и коэффициент корреляции представляется далеко не самым массовым из них, однако он один из простейших и при этом неплохо выявляет различие между изображениями. Данная функция сходства инвариантна к изменениям коэффициента контраста и яркости изображения. Чем выше коэффициент корреляции интерполированного и эталонного изображения, тем лучше работает метод интерполяции;
- 2) среднему квадратическому отклонению (СКО) от эталона. Эта функция сходства хорошо выявляет различие очень близких изображений, когда коэффициент корреляции близок к единице и слабо изменяется при изменении сравниваемых изображений. Она сделана инвариантной к изменению коэффициента контраста и яркости сравниваемых изображений путём минимизации функции сходства по этим параметрам. Чем данная функция сходства меньше, тем лучше работает метод интерполяции.

В качестве эталонного изображения маркера, с которым сравнивались все другие изображения маркеров, подвергшиеся интерполяции, было использовано изображение окрестности точки № 08 на одном снимке, где интерполируемые точки не попадали на эту окрестность. На *рис. 4–7* (см. с. 53) представлены результаты расчёта коэффициента корреляции окрестностей каждой из 15 точек с выбранным эталонным изображением, а также среднее квадратическое отклонение от эталонного изображения в зависимости от количества точек каждой окрестности, которые приходилось интерполировать. Как уже указывалось, все окрестности имеют размер 21×21 пиксель. Расчёт проводился для четырёх методов интерполяции.

Поиск соответствия изображений эталону совершался в окрестности точек, заданных «вручную». При этом сначала устанавливалось грубое соответствие с точностью до ± 1 пикселя, а затем устанавливалось соответствие с субпиксельной точностью по координатам смещения и поворота. На этапе установления грубого соответствия осуществлялся контроль наличия в ближайшей окрестности от найденного экстремума других экстремумов. Во всех случаях таких паразитных экстремумов не было выявлено.

Можно отметить, что в целом с увеличением количества интерполируемых точек коэффициент корреляции уменьшается, а СКО яркости растёт, что вполне ожидаемо. Однако неприятной особенностью процесса интерполяции становится сильная зависимость его результатов от положения точек, яркость которых необходимо интерполировать, относительно структурных элементов интерполируемого изображения. Если интерполируемая точка ложится на чёрное или белое поле, то интерполяция имеет малую ошибку. Если же интерполируемая точка ложится в области скачка яркости, то ошибка интерполяции может быть существенно больше. Об этом свидетельствует сильная изрезанность графиков на *рис. 4–7*. Такие пульсации коэффициента корреляции и СКО могут вызывать неустойчивость обнаружения заданных объектов, сбой слежения и ошибки измерения геометрических размеров по сравнению с обычными камерами, изображение которых не требуется подвергать интерполяции.

Сравним методы интерполяции по перечисленным выше двум критериям (коэффициент корреляции и СКО разности изображений). По величине коэффициента корреляции наихудшей оказывается интерполяция нулевого порядка. Интерполяции первого порядка, Шепарда и радиальными базисными функциями показали в целом весьма близкие результаты, хотя графики в мелких деталях и различаются. Видимо, это обусловлено тем, что во всех трёх случаях для интерполяции была использована яркость трёх ближайших пикселей, образующих треугольник, покрывающий интерполируемый пиксель.

Известно, что СКО лучше отражает малые различия изображений по сравнению с коэффициентом корреляции. По величине СКО наихудшие результаты показывает также интерполяция нулевого порядка. Результаты трёх оставшихся методов интерполяции оказываются очень близкими.

Таким образом, при недостатке вычислительной мощности может быть использована интерполяция нулевого порядка, если она обеспечивает удовлетворительные результаты. При более высоких требованиях к результатам интерполяции возможно применение одного из трёх рассмотренных методов. Из них наименее затратным в вычислительном плане можно считать интерполяцию первого порядка, а наиболее затратным — метод с использованием радиальных базисных функций. Следует также отметить, что методы интерполяции Шепарда и радиальными базисными функциями имеют довольно широкие возможности по настройке, что может позволить несколько улучшить их работу.

Возможно также использование комбинации методов, когда для предварительной обработки и выделения областей интереса используется интерполяция нулевого порядка, а для получения более точных результатов в выделенных областях интереса небольшой площади применяются более точные методы интерполяции.

Для сравнения интерполированных изображений с изображениями, полученными обычными камерами, были сделаны четыре снимка бытовой фотокамерой Sony той же самой комнаты с маркерами. Снимки выполнены приблизительно с той же высоты, что и камерой fish-eye. Расстояние до стены увеличили, поскольку бытовая камера не была оснащена широкоугольным объективом.

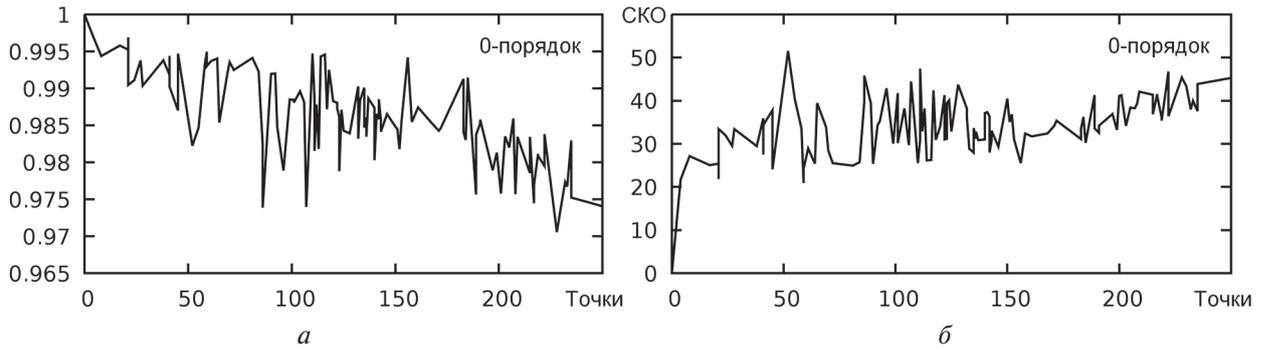


Рис. 4. Оценка результатов интерполяции нулевого порядка: коэффициент корреляции (a) и СКО яркости от эталонного изображения (b) в зависимости от количества интерполированных точек

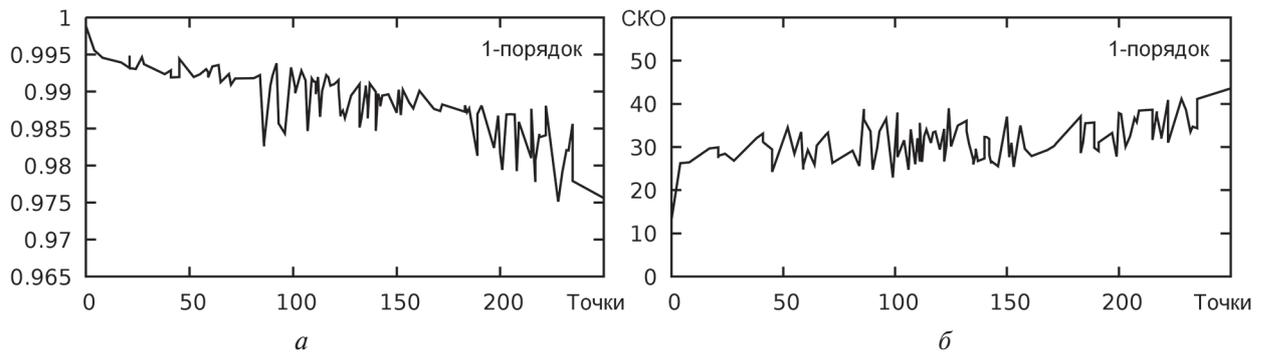


Рис. 5. Оценка результатов интерполяции первого порядка: коэффициент корреляции (a) и СКО яркости от эталонного изображения (b) в зависимости от количества интерполированных точек

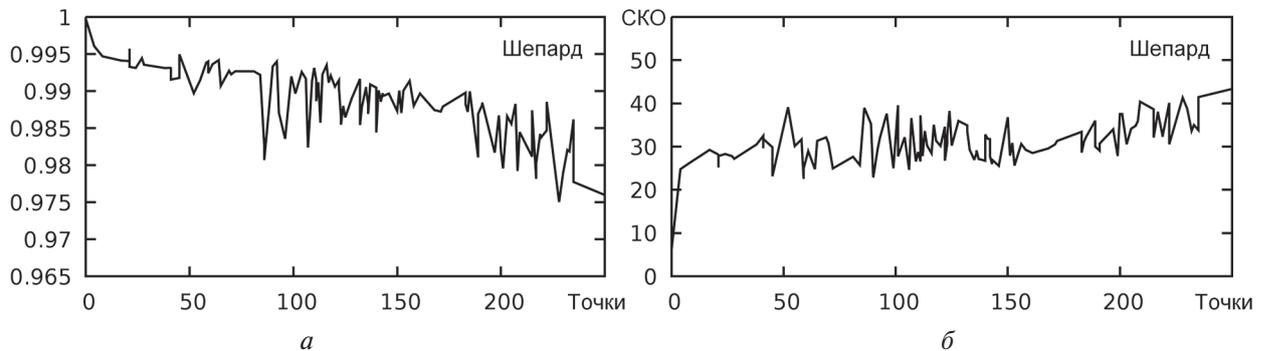


Рис. 6. Оценка результатов интерполяции Шепарда: коэффициент корреляции (a) и СКО яркости от эталонного изображения (b) в зависимости от количества интерполированных точек

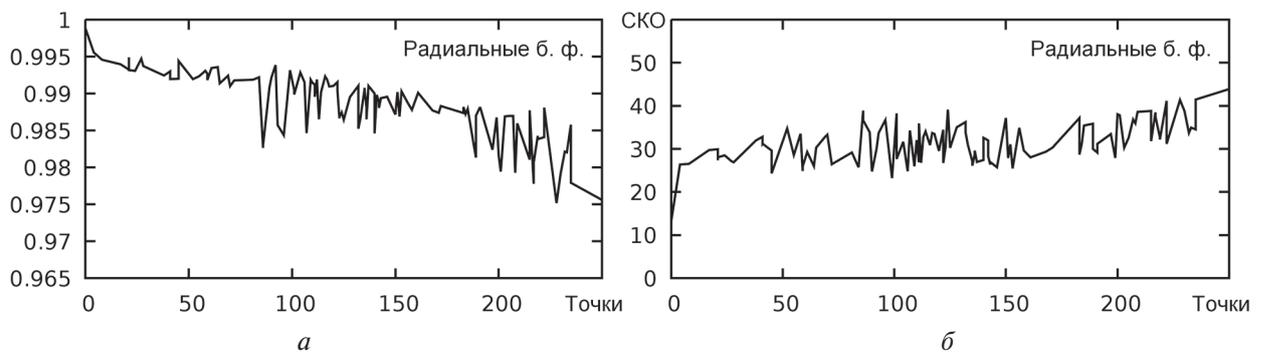


Рис. 7. Оценка результатов интерполяции с использованием радиальных базисных функций: коэффициент корреляции (a) и СКО яркости от эталонного изображения (b) в зависимости от количества интерполированных точек

Обычные фотоснимки были сделаны существенно позднее, чем восемь снимков камерой fish-eye, поэтому две точки (№ 25 и 04) оказались несколько смещёнными. На результаты оценок такое смещение не влияет, поскольку центр области грубого поиска задаётся вручную для каждого изображения. Один из полученных снимков представлен на *рис. 8*.



Рис. 8. Один из четырёх снимков помещения, сделанных бытовой камерой Sony

В качестве эталонного изображения маркера, с которым сравнивались все другие изображения маркеров, полученные бытовой камерой Sony, также было использовано изображение окрестности точки № 08 на одном из четырёх снимков. Результаты оценки коэффициента корреляции и СКО яркости от эталонного изображения представлены на *рис. 9*. Четыре снимка содержат $4 \times 15 = 60$ точек, что и соответствует числу отсчётов по горизонтальной оси графиков. Исходные изображения имели формат 5472×3648 пикселей и были предварительно преобразованы к формату 2048×2048 пикселей. Несмотря на то, что любые преобразования (в том числе и уменьшение размера) необратимо ухудшают качество изображений, даже в этих неблагоприятных условиях снимки, полученные обычной камерой, существенно превосходят изображения, полученные интерполяцией снимков камеры fish-eye.

У изображений, полученных обычной бытовой камерой, существенно больше величина коэффициента корреляции и значительно меньше СКО яркости от эталонного изображения. Это обусловлено тем, что в интерполированном изображении содержится меньше информации, что может серьёзно сказываться на надёжности распознавания. Кроме того, изрезанность графиков на *рис. 9* заметно меньше, чем на *рис. 4–7*.

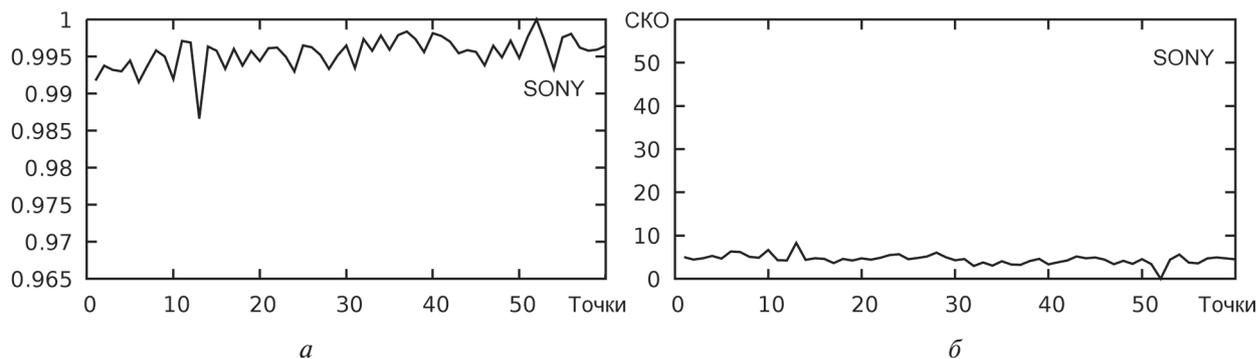


Рис. 9. Оценка коэффициента корреляции (а) и СКО яркости от эталонного изображения (б) для четырёх изображений, полученных для нескольких ориентаций и небольших смещений обычной камерой

Поскольку интерполяция вносит ошибки в значения яркости пикселей, интересно оценить, какая интенсивность шума, добавленная к яркости изображения, сформированного обычной камерой, приведёт приблизительно к тем же значениям коэффициента корреляции и СКО яркости, что наблюдаются в случае интерполированных изображений, полученных с камеры fish-eye. На рис. 10 показаны результаты добавления белого гауссова шума к изображениям, полученным с обычной камеры. Диапазон яркости этих изображений несколько меньше, чем 0–255. Средние значения коэффициента корреляции и СКО яркости от эталонного изображения приблизительно соответствуют параметрам, полученным для интерполяции первого порядка и интерполяции Шепарда изображений камеры fish-eye.

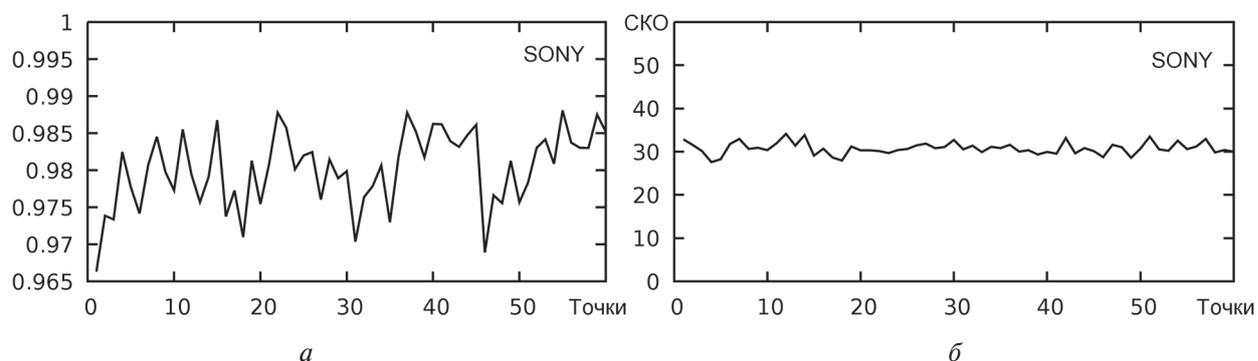


Рис. 10. Оценка влияния добавления шума на коэффициент корреляции (СКО белого гауссова шума $\sigma = 15$) (а) и СКО яркости от эталонного изображения ($\sigma = 75$) (б) для изображений, полученных с обычной камеры

Таким образом, интерполяция изображений, полученных с камеры fish-eye, сопоставима увеличению СКО шума изображения по сравнению с обычной камерой на $\sigma = 15$ ед. яркости для коэффициента корреляции. Если оценивать СКО яркости от эталонного изображения, то интерполяция изображений, полученных с камеры fish-eye, сопоставима увеличению СКО шума изображения по сравнению с обычной камерой на $\sigma = 75$ ед. яркости. Попутно можно отметить, что СКО яркости от эталонного изображения оказывается более устойчивой функцией сходства, чем корреляция.

Следует также отметить, что использованные маркеры представляются достаточно устойчивыми к ошибкам интерполяции отсутствующих пикселей. Дело в том, что ошибки интерполяции минимальны в областях с приблизительно одинаковой яркостью и растут в областях, соседствующих со скачками яркости. В использованных маркерах как раз преобладают пиксели, расположенные в областях с приблизительно одинаковой яркостью.

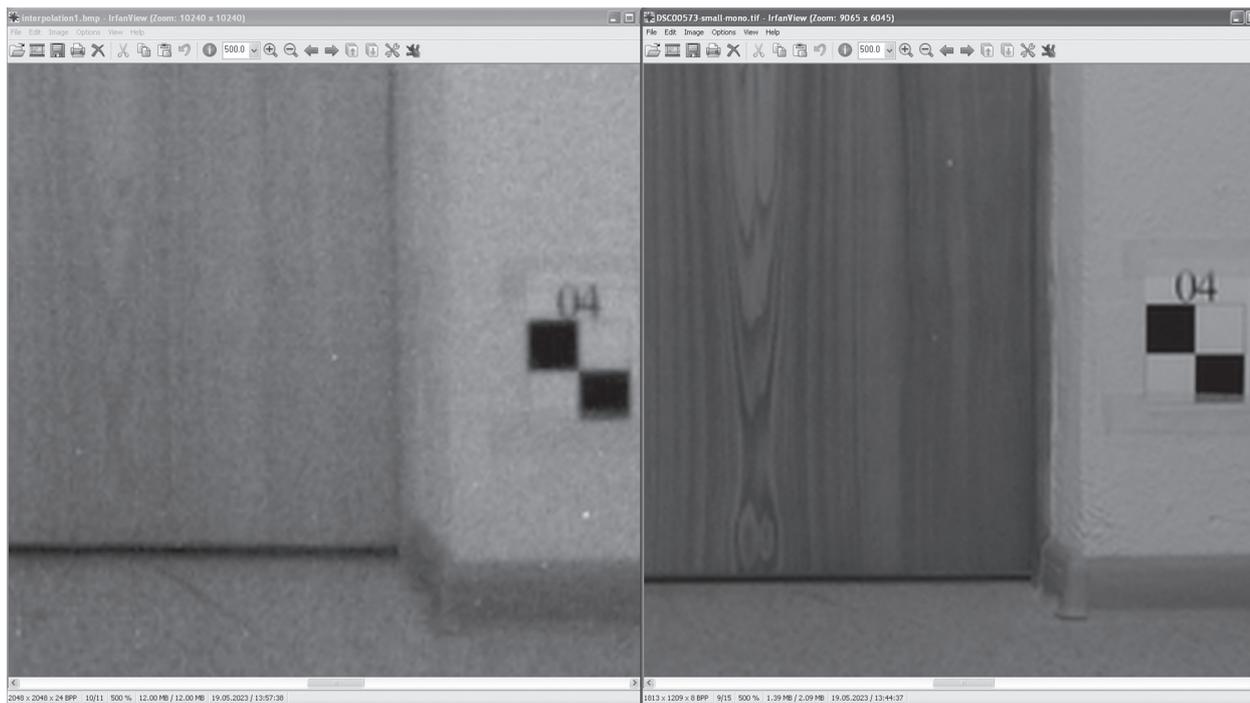


Рис. 11. Сравнение изображений, полученных интерполяцией изображения камеры fish-eye (слева) и обычной камерой (справа)

Иными словами, на изображениях с малой степенью корреляции яркости соседних пикселей интерполяция будет вносить большие ошибки. Для иллюстрации этого факта рассмотрим рис. 11, на котором представлены изображения с камеры fish-eye (слева) и с обычной камеры (справа). Оба изображения приведены к одинаковым размерам ширины двери в пикселях. Снимок, полученный с обычной камеры, демонстрирует достаточно хорошую проработку текстуры на деревянной двери. В то же время изображение текстуры на левом снимке, полученном трансформацией изображения с камеры fish-eye, даёт низкую детализацию текстуры и характеризуется значительной грануляцией, т.е. зернистостью. Это обусловлено интерполяцией яркости при недостаточном количестве точек, яркость которых известна, т.е. при недостатке информации.

Заключение

Выполненные расчёты показывают, что, хотя трансформация изображений, получаемых от сверхширокоугольных камер, включая камеры fish-eye, вполне возможна и визуально трансформированные изображения могут выглядеть вполне приемлемо, в процессе интерполяции таких изображений возникают искажения яркости, которые могут существенно ухудшить условия работы алгоритмов распознавания и измерения. Эти искажения обусловлены недостаточностью информации на снимках со сверхширокоугольных камер. Указанные искажения могут оказаться не слишком значимыми, если необходимо работать с контрастными маркерами достаточно большой площади, например такими, которые показаны на использованных снимках. И наоборот, подобные искажения могут оказаться совершенно недопустимыми при работе с информативными маркерами или фрагментами природных изображений. В каждом конкретном случае необходимо проводить экспериментальные исследования допустимости использования интерполяции снимков, сделанных сверхширокоугольными камерами, и максимального размера той области, которая подвергается трансформации.

Получаемые трансформированные изображения могут рассматриваться как резервный источник навигационной информации на случай отказа штатной узкоугольной навигацион-

ной камеры, а также для грубого поиска заданных ориентиров в широком поле зрения для передачи информации о них в блок обработки изображений, получаемых от узкоугольной камеры.

С другой стороны, при пониженных требованиях к точности навигации вполне возможно использование для навигации только сверхширокоугольных камер. При этом можно реализовать такое зонирование области изображений, получаемых от сверхширокоугольных камер, когда периферийные области изображения используются для обнаружения объектов, грубого определения их размеров и перехода в режим слежения. По мере движения объекта (объектов) к центру поля зрения указанные оценки уточняются, а задачи распознавания и точного измерения решаются, когда объект оказывается в центре поля зрения. При этом на периферии изображения можно использовать интерполяцию нулевого порядка как самую быструю, а ближе к центру изображения применять более точные методы интерполяции для обнаруженных объектов.

Похожим образом работает и зрение человека. Периферическое зрение выделяет заданные объекты (например, быстро перемещающиеся и/или большие по размерам), а центральное зрение выполняет точный анализ и распознавание.

Литература

1. *Аляутдинов А. Р., Кошель С. М.* Геометрическая трансформация цифровых картографических данных по опорным точкам // Картографический метод и возможности компьютерных систем / ред. Берлянт А. М., Паславски Я. Варшава, 2001. С. 93–97.
2. *Долгаль А. С., Костицын В. И., Новикова П. Н., Пугин А. В., Рашидов В. А., Христенко Л. А.* Практическое применение истокообразной аппроксимации геолого-геофизических данных // Геофизика. 2017. № 5. С. 29–37.
3. *Журавлев А. В., Журавлев В. М.* Многомерный алгоритм линейной интерполяции со сглаживанием на симплексном покрытии области с произвольным распределением узлов нерегулярной сетки // Изв. высш. учеб. заведений. Поволжский регион. Физ.-мат. науки. Физика. 2007. № 4. С. 93–104.
4. *Лазаренко В. П., Джамийков Т. С., Кортаев В. В., Ярышев С. Н.* Алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 30–39. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-30-39.
5. *Amidror I.* Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey // J. Electronic Imaging. 2002. V. 11. Iss. 2. P. 157–176. DOI: 10.1117/1.1455013.
6. *Basso K., De Avila Zingano P. R., Dal Sasso Freitas C. M.* Interpolation of Scattered Data: Investigating Alternatives for the Modified Shepard Method // Proc. 12th Brazilian Symp. Computer Graphics and Image Processing. Campinas, Brazil. 1999. Cat. No. PR00481. P. 39–47. DOI: 10.1109/SIBGRA.1999.805606.
7. *Dell'Accio F., Di Tommaso F.* Scattered data interpolation by Shepard's like methods: classical results and recent advances // Proc. Kernel-based Methods and Function Approximation. Dolomites Research Notes on Approximation. 2016. V. 9. P. 32–44.
8. *Franke R.* Scattered Data Interpolation: Tests of Some Method // Mathematics of Computation. 1982. V. 38. No. 157. P. 181–200. DOI: 10.2307/2007474.
9. *Iñiguez A.* Improving Image Resolution with Wide-Angle Lenses // A&S Intern. Jan. 2014. P. 48–54. <https://media.theiatech.com/documents/theia-whitepaper-improve-resolution-wide-angle-lens.pdf>.
10. *Masjukov A. V., Masjukov V. V.* A New Fast Iterative Method for Interpolation of Multivariate Scattered Data // Computational Methods in Applied Mathematics. 2005. V. 5. No. 3. P. 276–293.
11. *Peterson M.* Eliminate Distortion in Wide Angle Images // Theia Technologies. 2008. 3 p. <https://media.theiatech.com/documents/theia-whitepaper-eliminate-distortion-in-wide-angle-lenses.pdf>.
12. *Renka R. J.* Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data // ACM Trans. Mathematical Software. 1988. V. 14. No. 2. P. 139–148. DOI: 10.1145/45054.45055.
13. *Vlachkova K., Radev K. A.* Comparative Study of Methods for Scattered Data Interpolation Using Minimum Norm Networks and Quartic Triangular Bézier Surfaces // Proc. Information Systems and Grid Technologies Workshop, ISGT'2022. May 27–28 2022. Sofia, Bulgaria. 2022. P. 159–169.

Transformation of images captured by ultra-wide-angle lenses

V. A. Grishin, N. A. Stroilov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vgrishin@cosmos.ru

In various application areas (navigation systems, video recorders, surveillance systems, etc.), cameras with wide-angle or ultra-wide-angle lenses are used. Such cameras allow you to get an image in a wide viewing angle. Even for visual analysis, the captured images are not always suitable due to the presence of significant geometric distortions. For this reason, the captured images are subjected to special correction (transformation) to reduce these distortions. The situation becomes even more complicated if images obtained from ultra-wide-angle cameras need to be used to solve recognition and/or measurement problems. Moreover, in many cases it is advisable to transform the images obtained from such cameras to the usual model of the central projection. In the process of such a transformation, it becomes necessary to use the interpolation of brightness over a non-uniform grid of samples. Interpolation is necessary because in the process of correcting geometric distortions, the sample grid of the original image becomes sparse and does not form a dense coverage on the plane where the transformed image is projected. This effect leads to the need to use brightness interpolation. Although after such transformations the image is visually perceived as having no defects, however, in fact, the quality of the images deteriorates, which can affect the operation of recognition and/or measurement algorithms. Using a specific example, the article shows how significant distortions in the brightness of images can be with such a transformation.

Keywords: ultra-wide-angle lenses, fish-eye lenses, image transformation, image interpolation distortion

Accepted: 04.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-45-59

References

1. Alyautdinov A. R., Koshel S. M., Geometric transformation of digital cartographic data by reference points, In: *Kartograficheskii metod i vozmozhnosti komp'yuternykh sistem* (Cartographic method and possibilities of computer systems), Berlyant A. M., Paslavski Ya. A. (eds.), Warsaw, 2001, pp. 93–97 (in Russian).
2. Dolgal A. S., Kostitsyn V. I., Novikova P. N., Pugin A. V., Rashidov V. A., Khristenko L. A., Practical application of sourcewise approximation geological and geophysical data, *Geofizika*, 2017, No. 5, pp. 29–37 (in Russian).
3. Zhuravlev A. V., Zhuravlev V. M., A Multidimensional Algorithm for Linear Interpolation with Smoothing on a Simplex Coverage of a Domain with an Arbitrary Distribution of Irregular Grid Nodes, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Povolzhskii region, Fiziko-matematicheskie nauki, Fizika*, 2007, No. 4, pp. 93–104 (in Russian).
4. Lazarenko V. P., Djamiykov T. S., Korotaev V. V., Yaryshev S. N., Transformation algorithm for images obtained by omnidirectional cameras, *Scientific and Technical J. Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 30–39 (in Russian), DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-30-39.
5. Amidror I., Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey, *J. Electronic Imaging*, 2002, Vol. 11, Issue 2, pp. 157–176, DOI: 10.1117/1.1455013.
6. Basso K., De Avila Zingano P. R., Dal Sasso Freitas C. M., Interpolation of Scattered Data: Investigating Alternatives for the Modified Shepard Method, *Proc. 12th Brazilian Symp. Computer Graphics and Image Processing*, Campinas, Brazil, 1999, Cat. No. PR00481, pp. 39–47, DOI: 10.1109/SIBGRA.1999.805606.
7. Dell'Accio F., Di Tommaso F., Scattered data interpolation by Shepard's like methods: classical results and recent advances, *Proc. Kernel-based Methods and Function Approximation, Dolomites Research Notes on Approximation*, 2016, Vol. 9, pp. 32–44.
8. Franke R., Scattered Data Interpolation: Tests of Some Method, *Mathematics of Computation*, 1982, Vol. 38, No. 157, pp. 181–200, DOI: 10.2307/2007474.
9. Iñiguez A., Improving Image Resolution with Wide-Angle Lenses, *A&S Intern.*, Jan. 2014, pp. 48–54, <https://media.theiatech.com/documents/theia-whitepaper-improve-resolution-wide-angle-lens.pdf>.
10. Masjukov A. V., Masjukov V. V., A New Fast Iterative Method for Interpolation of Multivariate Scattered Data, *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2005, Vol. 5, No. 3, pp. 276–293.

11. Peterson M., Eliminate Distortion in Wide Angle Images, *Theia Technologies*, 2008, 3 p., <https://media.theiatech.com/documents/theia-whitepaper-eliminate-distortion-in-wide-angle-lenses.pdf>.
12. Renka R. J., Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data, *ACM Trans. Mathematical Software*, 1988, Vol. 14, No. 2, pp. 139–148, DOI: 10.1145/45054.45055.
13. Vlachkova K., Radev K. A., Comparative Study of Methods for Scattered Data Interpolation Using Minimum Norm Networks and Quartic Triangular Bézier Surfaces, *Proc. Information Systems and Grid Technologies Workshop, ISGT'2022*, May 27–28, 2022, Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 159–169.