

УДК 519.688:681.7.067.252.2

АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАБОТЕ С ШИРОКОУГОЛЬНОЙ ОПТИКОЙ

И.В. Шакиров***, А.М. Самойлов*, В.В. Гренке***

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: igor.shakirov@gmail.com

Рассматривается задача реконструкции сферических изображений, полученных при работе с широкоугольной оптикой. Предложен быстрый алгоритм попиксельной реконструкции. Получены соотношения, связывающие пиксели сферического и реконструируемого изображений. Приведены результаты работы алгоритма.

Введение

Как известно [1], при использовании оптических камер, например, телевизионных, немаловажными характеристиками являются параметры применяемой оптической системы. Среди существующих стандартных оптических объективов особый интерес представляет работа с широкоугольной оптикой (*ultra-wide angle lenses*) или с так называемым «рыбьим глазом» (*fish-eye lenses*). Как правило, объективы данной категории имеют угол обзора (угол раскрытия) 120...180°. Изображения, получаемые при использовании данной оптики, выглядят подобно отражению от зеркального шара или сферы. Пример такого изображения показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример изображения, выполненного с помощью широкоугольной оптики

Из рис. 1 видно, что при направлении камеры с широкоугольным объективом вертикально к земле («сверху-вниз») возможно сделать круговой «захват» всей окружающей территории на 360° по линии горизонта. При этом линия горизонта располагается вдоль всей внешней части окружности в снимке. Далее в статье такие изображения будут называться «сферическими».

Сферические изображения, полученные с помощью широкоугольных объективов, могут применяться в задачах связанных с требованиями широкого обзора. Например, мониторинг различных земных или технических поверхностей, системы видеонаблюдения, автоматические следящие и на-

вигационные системы и т. п. Однако имеются определенные затруднения в использовании сферических изображений, ввиду того, что сферические изображения содержат значительные геометрические искажения полученной информации. При работе со сферическими изображениями становится сложно оценить всю поступающую видеоинформацию и сопоставить ее с реально наблюдаемыми объектами. Поэтому чаще всего используются видеосистемы с обычной оптикой, дополнительно оснащенные менее эффективной и дорогостоящей механической системой позиционирования. Следовательно, возникает задача реконструкции сферических изображений (преобразования) к виду, пригодному для последующей обработки.

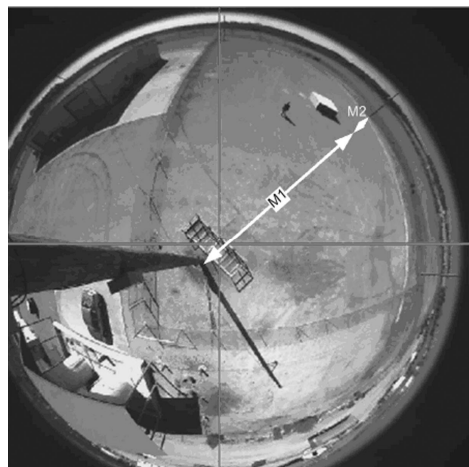
Анализ сферических изображений

На рис. 2 показаны примеры, наглядно демонстрирующие искажения в сферических изображениях. Например, показанные на рисунке отрезки M_1 и M_2 покрывают одинаковое расстояние на местности (рис. 2, а).

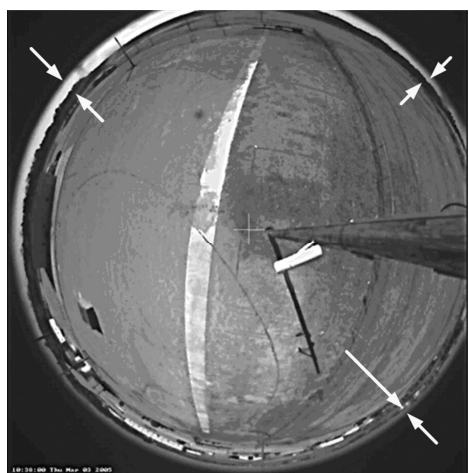
В каждом пикселе сферического изображения содержится тем больше информации о наблюдаемой поверхности, чем дальше он удален от центра изображения. Таким образом, информация о наблюдаемой поверхности на краях сферы сильно ужата и практически непригодна для анализа данных (рис. 2, б). Другими словами, искажения в сферическом изображении ближе к центру окружности — минимальны, а ближе к краям окружности — максимальны.

Исходя из сказанного, можно выделить четыре зоны на сферическом изображении, ранжированные по степени увеличения искажений для наблюдателя — человека. Это зоны A' , B' , C' и D' (рис. 3). Где A' — зона минимальных искажений, B' — зона средних искажений, C' — зона сильных искажений и D' — зона необратимых для реконструкции искажений. Следует отметить, что при использовании обычной оптики (то есть не широкоугольной) результатом наблюдения был бы участок изображения, содержащийся в зоне A' . При этом на изображении не будут присутствовать характерные для сферических изображений искажения, а само изображение будет более детальным, так как тот же самый набор пикселей принятого изображения будет содержать информа-

цию о значительно меньшем участке наблюдаемой поверхности. Следовательно, для видеосистем, использующих широкоугольные объективы, важным преимуществом является обработка видеоинформации, которая содержится в зонах B' и C' , иначе применение широкоугольной оптики для большинства приложений будет нецелесообразным.



а



б

Рис. 2. Примеры, демонстрирующие искажения в сферических изображениях

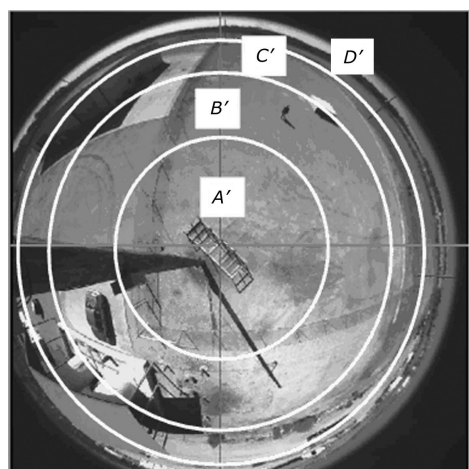


Рис. 3. Деление сферического изображения на участки по степени искаженности

Алгоритм реконструкции

Более наглядно задачу реконструкции сферического изображения можно показать на примере периодического рисунка на плоской поверхности, например, сетки, состоящей из квадратов (рис. 4).

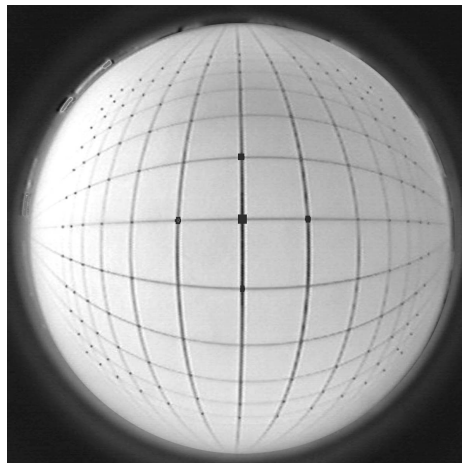


Рис. 4. Пример сферического изображения сетки

На рис. 4 отчетливо видно, что на краях окружности сферического изображения (или в зоне D') границы квадратов и их содержимое сливаются в общих пикселях, в то время как в центре окружности аналогичная информация представлена более детально. На рис. 5 изображена модель сферического изображения и изображение идеального (желаемого) результата реконструкции в границах зон A' , B' и C' . Из данного рисунка видно, что линии, проходящие через центр окружности на сферическом изображении (центральные линии), лежащие в плоскости перпендикулярной оптической оси, остаются прямыми, то есть не искривляются. Если повернуть камеру на произвольный угол вокруг оптической оси, то рисунок сетки повернется на тот же угол, но не изменится. Получаем, что любые отрезки принадлежащие линиям, проходящим через центр сферического изображения, не искривляются. Кроме того, следует вывод, что, при совпадении систем координат в сферическом изображении и в наблюдаемой плоскости, угол наклона для произвольной линии, проходящей через центр сферического изображения, равен реальному углу наклона данной линии.

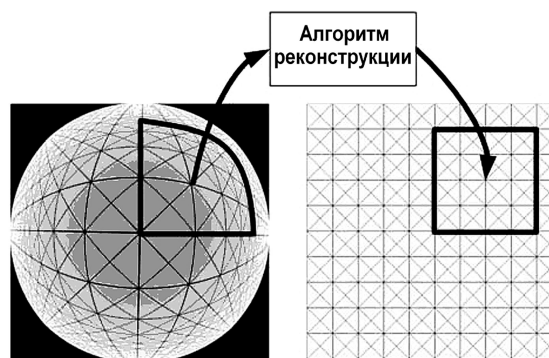


Рис. 5. Пример, показывающий задачу реконструкции сферического изображения

Рассмотрим произвольную точку M' , лежащую на сферическом снимке, и соответствующую ей точку M в существующем идеально-реконструированном изображении (рис. 6).

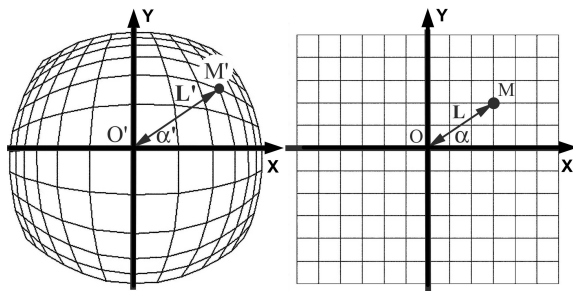


Рис. 6. Пример реконструкции одной точки на сферическом изображении

Так как отрезки OM и $O'M'$ принадлежат прямым, проходящим через центр изображений, то, исходя из вышесказанного, углы α и α' равны. Если известны длины отрезков L и L' , то становятся известны координаты точек M и M' . Соотношение длин отрезков L к L' константно для любых равноудаленных от центра изображения точек и зависит только от характеристик конкретного объектива, то есть является известным или вычисляемым параметром.

В задаче реконструкции сферического изображения координаты искомой точки M известны, так как это координаты текущей точки изображения, значение яркости которой и вычисляются (реконструируются). Следовательно, угол α и длина L являются вычисляемыми параметрами. Зная значение угла α' , которое равно значению угла α , и зная соотношения длин отрезков L и L' , можно найти координаты искомой точки M' . Таким образом, задача реконструкции сферического изображения может быть сведена к поиску на сферическом снимке координат точек, соответствующих координатам точек на реконструируемом изображении. Применительно к цифровым изображениям удобнее всего искать соответствие попиксельно.

Запишем соотношения, связывающие координаты пикселей матриц реконструированного и сферического изображения, следующим образом:

$$L(x, y) = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2}, \quad (1)$$

$$\alpha'(x, y) = \alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{y - Y_0}{x - X_0}\right), \quad (2)$$

$$L' = F(L), \quad (3)$$

$$x' = X_0' + \cos(\alpha') \cdot L', \quad (4)$$

$$y' = Y_0' + \sin(\alpha') \cdot L', \quad (5)$$

$$M_{x,y} = M'_{x',y'}, \quad (6)$$

где M – матрица пикселей реконструируемого изображения; M' – матрица пикселей сферического изображения; x и y – текущие координаты в матри-

це реконструируемого изображения; x' и y' – искомые координаты в матрице сферического изображения; X_0, Y_0 – координаты центра реконструируемого изображения; X_0', Y_0' – координаты центра сферического изображения; F – функция, описывающая зависимость длины отрезка L' от L .

Следовательно, для каждого пикселя матрицы M можно найти соответствующий пиксель в матрице M' , если будет известна зависимость длины отрезка L' от L . В реально действующей аппаратуре вычисления согласно формулам (1–5) могут проводиться только один раз для предварительного расчета соответствия координат $x \rightarrow x'$ и $y \rightarrow y'$. Каждое вновь получаемое изображение реконструируется согласно формуле (6).

Метод построения функции F

Как уже отмечалось выше, соотношение длин отрезков L к L' , описываемое функцией F (3), константно для любых равноудаленных от центра изображения точек и зависит только от характеристик конкретного объектива. К сожалению, аналитический вид функции F , как правило, неизвестен. Следовательно, необходимо решить задачу ее определения.

Наиболее простым решением является метод восстановления функции F по известным точкам наблюдаемой поверхности. Например, если нам известно точное геометрическое положение какого-либо объекта на наблюдаемой поверхности, то, зная его координаты x' и y' на сферическом изображении и зная его положение на реконструированном снимке, можно определить значение функции F для одной фиксированной длины. Сказанное иллюстрирует рис. 7.

На сферическом изображении (рис. 7, а) выделены точки $M1'$, $M2'$ и $M3'$, выбранные ввиду того, что на наблюдаемой местности им соответствуют объекты, расстояния до которых легко измерить (например, вручную). Центральная точка O' является точкой, над которой висит камера направленная вертикально вниз. Расстояния $L1'$, $L2'$ и $L3'$ высчитываются по сферическому изображению в пикселях. На реконструируемом изображении поверхности определяются положения точек $M1$, $M2$, $M3$ и O согласно их реальному распределению на наблюдаемой поверхности (см. рис. 7, б), после чего высчитываются расстояния $L1$, $L2$ и $L3$ в пикселях.

Для полного построения функции F необходимо соединить экспериментальные точки гладкой кривой. Лучше всего для этих целей подходит интерполяция кубическими сплайнами [2]. Смысл сплайн-интерполяции заключается в том, что в каждом промежутке между узловыми точками осуществляется аппроксимация в виде зависимости:

$$F(L) = k_3 \cdot L^3 + k_2 \cdot L^2 + k_1 \cdot L + k_0, \quad (7)$$

где коэффициенты k_0, k_1, k_2, k_3 рассчитываются независимо для каждого промежутка, исходя из значений L в соседних точках. Так как при нулевой длине отрезка на L' на сферическом снимке мы имеем нулевую длину соответствующего ему отрез-

ка на реконструируемом снимке, то соотношение (7) запишется в следующем виде:

$$F(0) = 0. \quad (8)$$

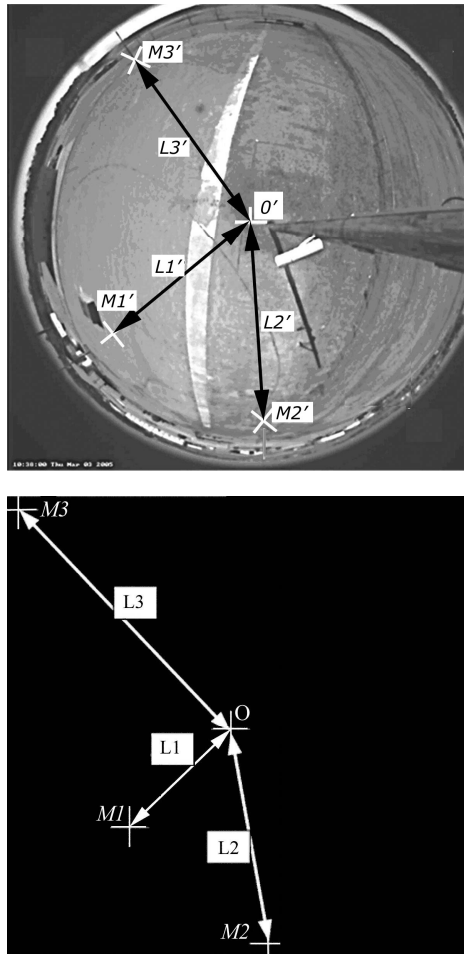


Рис. 7. Метод определения функции F

Сплайн-интерполяция обеспечивает равенство в узлах не только самих соседних интерполирующих функций (сплайнов), но и их первых производных. Поэтому результат сплайн-интерполяции выглядит как гладкая функция. Отметим, что график зависимости L' от L (3), будет более точным, если в сплайн-интерполяции будет участвовать как можно больше предварительно измеренных точек. На рис. 8 приведен пример полученной зависимости L' от L .

На данном рисунке сплайн-интерполяция проводилась по восьми точкам, включая нулевую точку (8). Жирными точками выделены полученные экспериментальным путем значения соотношений L к L' . Пунктирными линиями выделены расстояния, которые лежат внутри соответствующих областей A' , B' , C' (рис. 3), и соответствующие им значения в области реконструкции a , b , c . Из рис. 8 видно, что области c , покрывающей на реконструированном снимке значительную часть относительно центра изображения, соответствует меньшая область C' сферического снимка, то есть идет сильное сжатие и искажение информации на краях окружности. Обратно, небольшой области a соответствует зна-

чительная часть сферического изображения A' , располагающаяся ближе к центру сферы. Вид кривой функции F указывает, что величина L' является ограниченной, а величина L может быть бесконечно большой (рис. 8). С физической точки зрения это верно, поскольку величина L' ограничена размерами принятого сферического изображения; величина L — это расстояние до объекта наблюдения. Так как широкоугольная оптика позволяет вести круговое наблюдение от горизонта до горизонта, то величина L может быть бесконечно большой. Однако, при восстановлении дальних объектов, результат реконструкции будет сильно искажен по причине того, что вся информация об наблюдаемых удаленных расстояниях сосредоточена на крайних пикселях сферического изображения, то есть сжата.

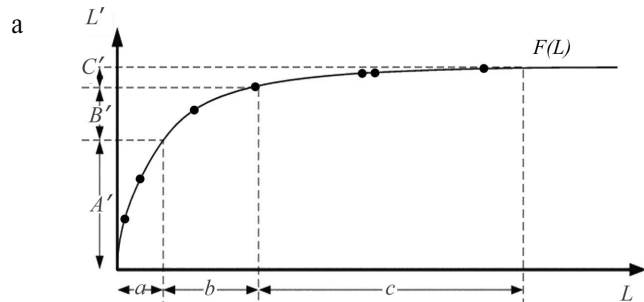


Рис. 8. Зависимость длины L' от L

На рис. 9 представлен результат реконструкции ранее показанного изображения сетки (рис. 4).

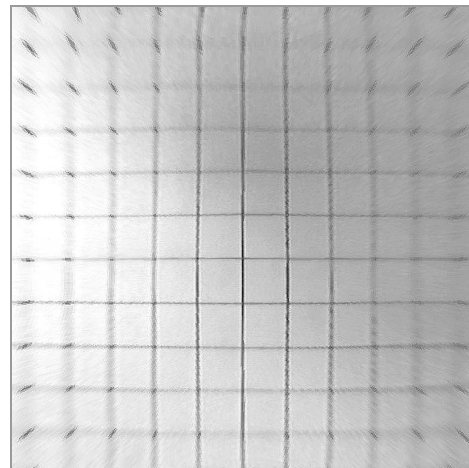


Рис. 9. Результат реконструкции

Результат реконструкции реального сферического снимка поверхности показан на рис. 10.

Из рисунка видно, что результат реконструкции (рис. 10, б) сферического снимка (рис. 10, а) было бы желательно развернуть на небольшой угол так, чтобы стороны прямоугольника наблюдаемой зоны были параллельны сторонам изображения. Для этого достаточно модифицировать выражение (2) к виду:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{y - Y_0}{x - X_0} \right),$$

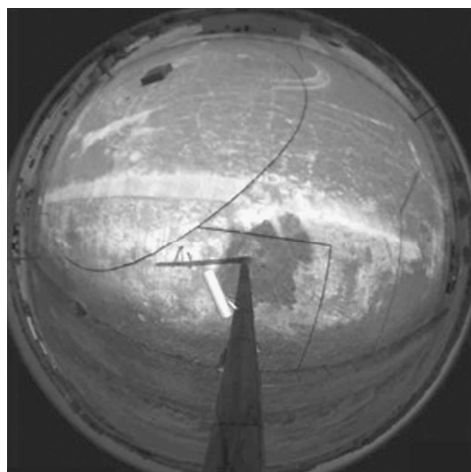
$$\alpha' = \alpha + \beta,$$

где β – произвольный угол поворота. Кроме того, если дополнительно потребуются сжать или растянуть реконструируемое изображение, то для этого достаточно изменить соотношения (4, 5) к следующему виду:

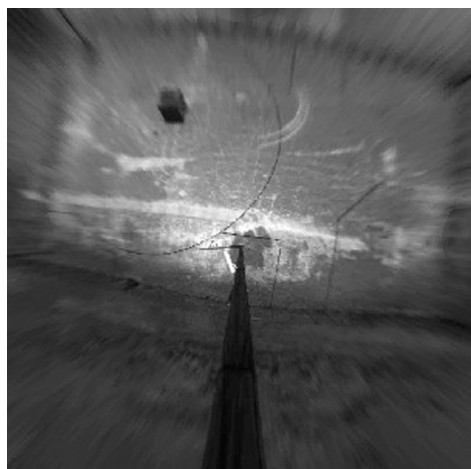
$$x' = X_0' + \cos(\alpha') \cdot L' \cdot Kx,$$

$$y' = Y_0' + \sin(\alpha') \cdot L' \cdot Ky,$$

где Kx и Ky – коэффициент сжатия по оси X и Y соответственно.



а



б

Рис. 10. Результат реконструкции реального сферического снимка

Таким образом, можно обеспечить вращение, сжатие или растяжение, а также другие аффинные преобразования непосредственно в алгоритме реконструкции, исключая дополнительную и затратную, в вычислительном плане, последующую обработку изображения.

Заключение

1. Предложен быстрый алгоритм попиксельной реконструкции сферических изображений, работающий на принципе поиска на сферическом снимке координат пикселя, соответствующего координатам пикселя на реконструируемом изображении. Алгоритм позволяет:
 - легко синтезировать быстрые алгоритмы частичной реконструкции зон интереса сферического изображения без предварительной реконструкции всей поверхности снимка;
 - выполнять различные аффинные преобразования, на этапе предварительного расчета соответствия координат пикселей, т. е. без дополнительных вычислительных затрат на этапе реконструкции. Например, вращение, растяжение, зеркальное отображение и смещение.
2. Получен аналитический вид функции, описывающей соотношение длин отрезков, принадлежащих центральным линиям, с использованием кубической сплайн-интерполяции. Данный метод может использоваться самостоятельно в аналогичных работах или в работах по исследованию характеристик самой широкоугольной оптики.
3. Алгоритм попиксельной реконструкции сферических изображений и метод полуавтоматического расчета аналитической функции F по сферическому изображению периодического рисунка (необходимо задать параметры рисунка) реализованы в программной библиотеке на языке Си. Дополнительно на языке Си реализованы пользовательские модули для программы MathCad, что позволяет пользователю выполнять научно-практические эксперименты, связанные с обработкой подобных изображений, непосредственно в MathCad.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Форсайт Д.А. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
2. Роджерс Д., Адамс Д. Математические основы машинной графики. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

Поступила 31.10.2006 г.