

# КАЛИБРОВКА ОРДИНАРНЫХ СКАНЕРОВ ПО НАБОРУ ЭТАЛОННЫХ СЕТОК ДЛЯ ВВОДА КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Алсынбаев К.С., Ерофеев С.Г., Ким П.А.

Новосибирский госуниверситет, ИВМиМГ СО РАН

## АННОТАЦИЯ

При использовании растровых изображений высокоточных карт одним из препятствий является недостаточная линейная точность сканера. Разработана технология программной калибровки сканеров, предполагающая следующие шаги:

- Сканером вводится высокоточный шаблон, имеющий вид сетки линий или точек. Программно распознаются узлы сетки и строится калибровочная матрица.
- Выявляется стабильность погрешностей сканера.
- Вводятся карты и их геометрия корректируется программно с использованием калибровочной матрицы.
- Повышение точности возможно, как за счет увеличения подробности шаблона, так и за счет повторного ввода шаблона, с калиброванным сдвигом.
- Дополнительные возможности представляются при использовании набора эталонных сеток, в том числе сетки линий, покрывающей область правильными треугольниками, взамен квадратов для прямоугольной сетки.

Программа калибровки корректирует вводимые растровые изображения кусочно-аффинными или кусочно-проективными преобразованиями. Скорость преобразований обеспечивается дифференциальными операторами. Гарантированная точность калиброванного ввода оценивается формулой

$$\text{Максимальная Погрешность} = S \cdot U \cdot K + R + T,$$

где  $S$  - шаг сетки,  $U$  - максимальное угловое искажение сетки в радианах,  $K$  - максимальный коэффициент локальной линейной деформации,  $R$  - размер пикселя,  $T$  - точность шаблона.

**Ключевые слова:** сканирование, геометрические преобразования на плоскости, калибровка, картография, цифровая обработка изображений.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Многие категории карт требуют сохранения своей изначально высокой точности и после их сканирования. При использовании технологии растровой векторизации этому препятствует линейная точность сканера, которая у массовых серийных сканеров может быть существенно

ниже допустимой погрешности. Особенно заметно это проявляется у проекционных сканеров со сменной оптикой. В большинстве случаев такие искажения носят относительно стабильный характер, то есть не претерпевают значительных изменений в течение определенного времени.

Технология, разработанная совместно Новосибирским государственным университетом и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской Академии Наук, предполагает следующие шаги коррекции искажений программными средствами [1]:

1) Сканерный ввод высокоточного эталонного изображения, имеющего вид матрицы точек или сетки линий. Специальная программа распознает узлы эталонного изображения и строит калибровочную матрицу. Определяется уровень погрешности сканера.

2) Для выявления стабильности погрешностей сканера, через определенные промежутки времени осуществляется повторный ввод.

3) При недостаточной линейной точности сканера и при условии стабильности искажений дальнейший ввод изображений корректируется программно с использованием калибровочной матрицы.

В основе технологии лежит идея, предварительного ввода эталонного изображения, с известной геометрией, на котором автоматически распознаются узловы точки. В результирующем растровом поле определяются позиции, в которые должны были бы попасть узлы при правильном вводе сканером. Для корректировки геометрии вводимых изображений вычисляется функция, которая отображает узлы в «правильные» позиции, а положение точек между узлами

аппроксимируется с учетом расположения ближайших узлов. Иными словами, корректировка основана на размещении каждого «гнезда» сетки в полагающееся ему место. Поскольку прямоугольный или квадратный фрагмент мог деформироваться при сканировании, то он размещается посредством кусочно-аффинных или кусочно-проективных преобразований. Изложим метод более формально.

Допустим, что разрешение используемого сканера в среднем  $R$  точек на миллиметр, а эталонное изображение представляет собой сетку прямых линий или матрицу точек, имеющих шаг  $Dx$  по горизонтали и  $Dy$  по вертикали (здесь и далее все линейные размеры даны в миллиметрах). В поле сканера размещается прямоугольная часть эталонного изображения, имеющая  $N$  узлов по горизонтали и  $M$  узлов по вертикали. Пусть, в некоторой физической системе координат поля сканера, центры этих узлов имеют координаты  $(X1_i, Y1_j)$ . После ввода сканером в растровом изображении появится деформированное изображение сетки линий или матрицы точек. При этом узлы растрового образа имеют в системе координат растрового изображения координаты  $(X2_i, Y2_j)$ . Линии сетки или точки матрицы распознаются программно, и также определяются значения координат  $(X2_i, Y2_j)$ .

Строится модель геометрии скорректированного изображения, основанная на том, что при правильном вводе узлы должны были бы отображаться в точки, имеющие координаты

$$X3_i = Vx + (i-1)*Dx/R$$

$$Y3_j = Vy + (j-1)*Dy/R,$$

где  $Vx$  и  $Vy$  - некоторые выбранные размеры бордюра вокруг поля сетки по горизонтальным и вертикальным краям (в пикселях). Растровое изображение для скорректированного изображения будет иметь, таким образом, размеры

$$2*Vx+(N-1)*Dx/R*Dx$$

по горизонтали, и

$$2*Vy+(N-1)*Dy/R*Dy$$

по вертикали.

В качестве корректировочной функции строится кусочно-аффинная или кусочно-проективная функция  $F$  такая, что  $(X2_i, Y2_j)$  отображается в точку  $(X3_i, Y3_j)$ . Кусочно-аффинная составляется из аффинных функций для треугольников вида

$$(X2_i, Y2_j) (X2_{i+1}, Y2_j) (X2_i, Y2_{j+1})$$

$$(X2_{i+1}, Y2_j) (X2_i, Y2_{j+1}) (X2_{i+1}, Y2_{j+1}),$$

отображаемых в треугольники соответственно

$$(X3_i, Y3_j) (X3_{i+1}, Y3_j) (X3_i, Y3_{j+1})$$

$$(X3_{i+1}, Y3_j) (X3_i, Y3_{j+1}) (X3_{i+1}, Y3_{j+1}).$$

Как известно, аффинная функция, имеющая для плоских преобразований вид

$$X' = a*X+b*Y+c$$

$$Y' = d*X+e*Y+c$$

однозначно определяется тремя парами точек, где из каждой пары первая точка отображается во вторую.

Кусочно-проективная функция, имеющая вид

$$X' = (a*X+b*Y+c)/(g*X+h*Y+1)$$

$$Y' = (d*X+e*Y+c)/(g*X+h*Y+1)$$

отображает каждый четырехугольник

$(X2_i, Y2_j) (X2_{i+1}, Y2_j) (X2_{i+1}, Y2_{j+1}) (X2_i, Y2_{j+1})$   
в прямоугольник

$(X3_i, Y3_j) (X3_{i+1}, Y3_j) (X3_{i+1}, Y3_{j+1}) (X3_i, Y3_{j+1})$ ,  
однозначно определяясь условием перехода вершин четырехугольника в вершины прямоугольника.

Построенные таким образом функции корректировки точно восстанавливают позиции, соответствующие узлам эталонного изображения и, в случае выбора кусочно-аффинных преобразований, билинейно аппроксимируют пиксели, располагающиеся внутри треугольников, в случае кусочно-проективных преобразований, аппроксимируют проективными преобразованиями пиксели, лежащие внутри четырехугольников.

## 2. РАСПОЗНАВАНИЕ УЗЛОВ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Возможны два варианта эталонного изображения. Первый - эталонное изображение представляет собой прямоугольную матрицу небольших по размеру точек. Второй - эталонное изображение является сеткой из прямых линий. В обоих случаях объектами для поиска при автоматическом распознавании являются узловые точки, то есть либо центры точек для первого варианта, либо пересечения прямых во втором варианте. Первый вариант удобнее тем, что для него легче изготовить эталонное изображение, например, при помощи матричного принтера, но он обеспечивает несколько меньшую точность распознавания. Второй вариант обеспечивает лучшую точность при распознавании узлов за счет избыточности изображения в случае распознавания не перекрестий, а «перекладиин» сетки.

Программа распознавания эталона имеет следующие блоки: предварительное улучшение изображения, собственно поиск точек, размещение точек по колонкам и строкам, диалоговый графический редактор. Последний блок позволяет вручную подправить результат автоматического поиска. Результатом является калибровочная матрица, содержащая, собственно, значения координат узлов.

В качестве редактора можно использовать редактор растрового векторизатора TRACK, разработанного в Новосибирском государственном университете.

Алгоритмы распознавания регулярной сетки дают правильный результат, когда положение узла смещено относительно соседних узлов не более чем на треть шага сетки, а весь эталон развернут в поле сканера не более чем на 30-40 градусов.

В принципе можно было разработать алгоритм, который бы распознавал узлы сетки при произвольном положении эталона в поле сканера, но технология требует достаточно тщательной ориентации эталона относительно горизонтали и вертикали. Это обусловлено тем, что при последующем вводе и

корректировке изображений, последние ориентируются относительно колонок и столбцов калибровочной матрицы, а тщательная ориентация эталонного изображения необходима для более полного заполнения поля сканера при отсутствии видимых «разворотов» изображения после корректировки.

### **3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ СКАНЕРА И СТЕПЕНИ СТАБИЛЬНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ**

Определение геометрической точности сканера основано на анализе калибровочной матрицы. Программа дополнительно запрашивает разрешение сканера (или выбирает его из тегов TIFF-файла), осуществляется перебор по нескольким способам привязки: крайних точек, точек в центре. Вычисляются максимальные отклонения узлов от полагающейся им позиции, при этом координаты узлов определяются двумя способами привязки: плоскопараллельного переноса плюс поворота и методом проективных преобразований. Выдается протокол максимальных отклонений для каждого из вариантов, анализ которого позволяет пользователю принять решение: годится ли линейная точность сканера без дополнительных преобразований; возможно ли использование сканера без дополнительной коррекции, но введенная карта нуждается в привязке проективным методом; либо же необходима коррекция изображения.

Определение стабильности погрешностей сканера осуществляется довольно просто: через некоторые промежутки времени производится вычисление калибровочной матрицы. Программа сравнивает координаты соответствующих узлов и вычисляет максимальное отклонение. Его значение и позволяет оценить стабильность геометрических искажений сканера.

### **4. ПРОГРАММЫ КОРРЕКТИРОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ**

Алгоритмы выполнения кусочно-аффинных или кусочно-проективных преобразований выполнены с использованием известных приемов оперирования с растрами: для заполнения целевого растра вычисляются точки прообразов, применяются известные рекуррентные соотношения для повышения скорости аффинных преобразований:

$$F(X+1, Y) = F(X, Y) + a$$

$$F(X, Y+1) = F(X, Y) + e$$

Растровые вычисления выполнены в двух вариантах: по ближайшему дискрету для повышенной скорости и методом усреднения прообраза путем разбиения пикселей на подклетки. Первый вариант обеспечивает большую скорость преобразований: на компьютере IBM486 с 12 мегабайтами оперативной памяти кадр 2000 на 3000 пикселей корректируется за 15 секунд. Второй вариант при разбиении пикселей исходного изображения на 16 подклеток работает на порядок дольше.

Выбор кусочно-аффинных или кусочно-проективных преобразований определяется достоинствами и недостатками каждого из этих выборов.

Проективные преобразования, как правило, более точно воспроизводят реальные механизмы деформации, чем кусочно-аффинные, особенно для проективных сканеров. Но в общем случае при кусочно-проективных преобразованиях не обеспечивается точная склейка объектов, помещающихся на смежных четырехугольных «гнездах», а при кусочно-аффинных обеспечивается. Легко видеть, что это вытекает из свойств аффинного и проективного преобразований: первые сохраняют пропорции при отображении отрезков, а вторые - нет. Поэтому при деформациях изображений, при которых после отображения сетки существуют в образе  $(X_{2i}, Y_{2j})$  существуют соседние четырехугольники, существенно отличающиеся по форме, после выполнения функции  $F$  в восстановленном изображении возможны, например, разрывы линий при переходе из одного четырехугольного в

другой. Такой характер искажений сканера возможен, например, при дефектах оптики и механики, дающих локальные ошибки. Чаще же искажения изображения носят постепенный характер, например, «бочкообразность» оптических искажений или слабая «перспективность» ввода из-за неточной ориентации головки сканера, и при этом проективные отображения для соседних фрагментов очень близки, и смещения объектов на краях малы, часто меньше размеров пикселей.

Поэтому в случае отсутствия заметных локальных искажений необходимо использовать кусочно-проективные преобразования, в противном случае - кусочно-аффинные.

## **5. ОЦЕНКА ГАРАНТИРОВАННОЙ ТОЧНОСТИ КОРРЕКТИРОВАННОГО ВВОДА**

Оценим гарантированную точность корректированного ввода. Мы не будем рассматривать погрешности, связанные с деформацией картматериала или ошибками при изготовлении карты. Очевидно, что погрешности операций технологической цепочки складываются из ошибок изготовления эталонного изображения, погрешностей округления при дискретизации, ошибок аппроксимации для внутренних точек четырехугольных областей и погрешностей изготовления и ввода эталонного изображения.

Погрешность аппроксимации можно оценить сверху только в случае наличия ограничений на характер искажений. Естественным можно считать предположение, что искажения достаточно «плавные». Это можно выразить условием, что локальные линейные деформации на отрезке длиной  $L$  не превышают  $K \cdot L$ , где  $K \ll 1$ . Предположим также, что угловые деформации не превышают  $U$ , где  $U$  дано в радианах и также не превышают 0.05 (около 10 градусов). В этом случае мы можем считать, что  $\sin(U)$  приблизительно равно  $U$ . Тогда максимальная

деформация внутри четырехугольника равна  $S \cdot K \cdot U$ . Таким образом, гарантированная точность ввода оценивается формулой

Максимальная Погрешность =  $S \cdot K \cdot U + R + T$ , где  $S$  - шаг сетки,  $U$  - максимальное угловое искажение сетки в радианах,  $K$  - максимальный коэффициент локальной линейной деформации,  $R$  - размер пикселя,  $T$  - точность изготовления эталонного изображения.

Поэтому, чем меньше шаг между узлами, тем более точно восстанавливается исходная геометрия изображения. Разумеется, имеется некий предел, далее которого бессмысленно уменьшать шаг сетки. Расстояния между узлами на два - два с половиной порядка должны превышать размер пикселя и точность изготовления эталонного изображения. Отметим, что движение по этому пути ограничивается возможностями алгоритмов распознавания узлов сетки, зависящих как от пиксельного разрешения устройств ввода, так и от "масочных операций", используемых при этом.

## 6. НАБОР ЭТАЛОННЫХ СЕТОК

Дальнейшая эффективизация ввода может вестись также посредством многократного с калиброванным сдвигом ввода эталонных сеток. При фиксированном положении оптической системы калиброванный сдвиг эталонной сетки позволяет более плотно разметить плоскость сканирования, не внося при этом помехи для алгоритмов восстановления изображения эталонной сетки.

Интересные возможности предоставляет сетка, построенная на основе покрытия плоскости равносторонними треугольниками [2]. Каждый узел такой сетки получается в результате пересечения трех прямых. В качестве базовых удобно выбрать прямые, параллельные оси  $X$ . В данном случае при преобразованиях мы ограничиваемся только кусочно-аффинными преобразованиями, что обеспечивает отсутствие "разрывов" на преобразованном изображении. Усреднение результатов ввода по сдвинутым

калибровочным треугольным сеткам сохраняет непрерывность изображения.

Также как и для прямоугольной сетки возможны два варианта представления эталона. В первом случае это фрагмент скошенной прямоугольной матрицы небольших по размеру точек, размещенных по вершинам правильного ромба с углом 30 градусов, при вертикальном расположении длинной диагонали ромба. Во втором случае эталонное изображение является сеткой из прямых линий, проходящих в трех направлениях, причем имеют место только узлы получающиеся пересечением трех прямых. Предполагается единственность с точностью до сдвига и масштабирования такой сетки.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программное обеспечение может использоваться для произвольного сканера. Оно входит в программное обеспечение сканера «Унискан», выпускаемого фирмой «Унискан» в г.Новосибирске. Разработчики сканера включили новый тег в TIFF-формате выходного изображения, в котором задается смещение вводимого фрагмента относительно левого верхнего угла поля сканера, благодаря чему можно использовать результаты ввода и распознавания эталонного изображения на всем поле сканера для корректировки геометрии любого фрагмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алсынбаев К.С., Ерофеев С.Г., Ким П.А. Использование ординарных сканеров для высокоточного ввода карт. Интеркарто 3, Россия, Гис для устойчивого развития окружающей среды, 1997г, с.362-368.
2. G.Brookshire, M.Nadler, C.Lee Automated Stereophotogrammetry, in Computer Vision, Graphics and Image Processing 52, 1990, pp 276-296.

*Сведения об авторах:*

Алсынбаев Камил Салихович - зав.лаб., к.т.н.,  
Ерофеев Станислав Геннадьевич -  
программист. Лаборатория системного  
программного обеспечения, Новосибирский  
государственный университет.

Ким Павел Алексеевич - с.н.с., к.ф.-м.н.,  
Лаборатория математического обеспечения  
обработки изображений. Институт  
Вычислительной Математики и  
Математической Геофизики. Дом 6, пр.  
Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Россия

Тел.: 8-3832-342-332

E-mail: kim@ooi.sccc.ru

**CALIBRATION OF ORDINARY SCAN-  
NERS WITH THE SET OF  
STANDARD GRIDS FOR INPUT OF CAR-  
TOGRAPHIC IMAGES**

K.S. Alsynbaev, S.G.Erofeev, P.A. Kim

**ABSTRACT**

For using of raster images of high-precision maps one from obstacles is the insufficient linear precision of the scanner. The technology of program calibration of scanners is developed and supposed the following steps:

1. The scanner inputs a high quality pattern template that is looking like a grid of lines or points. Nodes of a grid are searched and recognized automatically and the calibration matrix is created.
2. The stability of errors of the scanner is detected.
3. The maps are inputted and their geometry is corrected automatically with use of a calibration matrix.
4. The raise of exactitude is possible, both at the expense of magnification of a detail of a template, and at the expense of reentering template, with some calibrated shift.
5. The additional possibilities are represented at use of a set of standard grids, including grid of lines covering area by right triangles, instead of quadrates for a rectangular grid.

The program of calibration corrects entered raster images by partial-affined or partial-projective transformations. The velocity of transformations is ensured with differential operators.

Linear precision of the calibrated input is estimated by the formula

$$\text{Maximum Error} = S \cdot U \cdot K + R + T,$$

Where S - pitch of a grid, U - maximal angular distortion of a grid in radians, K - maximal factor of a local linear deformation, R - size of one pixel, T - precision of a pattern template.

**Authors:**

Kamil S. Alsynbaev, Ph.D, head of lab.

Stanislav G.Erofeev, programmer,

Novosibirsk State University .

kamil@nsu.ru, stas@lsp.nsu.ru,

Pavel A. Kim, Ph.D, senior researcher

Image processing laboratory

Institute of Computational Mathematics and

Mathematical Geophysics of SB RAS

6, Lavrentiev ave., 630090, Novosibirsk, Russia

Tel.: 007-3832-342-332

E-mail: kim@ooi.sccc.ru