

УДК 004.932.2

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СКОЛЬЗЯЩЕГО ЗАТВОРА

А. Ю. КОВЗАРЬ

РЕЗЮМЕ. В работе рассматривается проблема искривления изображения получаемого из КМОП сенсора, именуемая эффектом "скользящего затвора". Ее решения рассматривается в два этапа. Первый использует эффективный алгоритм регистрации изображений для расчёта углового смещения элементов видеоряда относительно предыдущего. Второй восстанавливает содержание кадра на основании геометрической модели углового движения камеры.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент наиболее распространены две технологии построения сенсоров для цифровых фотоаппаратов и видеокамер, а именно КМОП (сокр. от "комплементарный металлооксидный полупроводник") и ПЗС (сокр. от "прибор с зарядовой связью"). Одной из ключевых особенностей большинства КМОП сенсоров, является поочередное снятие данных из пикселей матрицы, в то время как изображение из ПЗС сенсоров получается в один момент времени. Такая конструкция КМОП сенсоров порождает определенные искажения (рис. 1), именуемые эффектом "скользящего затвора" (англ. "rolling shutter"). Он становится заметным при динамичной смене картинки. Искажения можно условно разделить на две категории по источнику движения — искажения от движения камеры (рис. 1а) и искажения от быстро движущихся объектов (рис. 1б–1г). Последние являются очень разнообразными и их устранение требует специфической обработки каждого случая отдельно. Но на видеоряде чаще всего заметны искажения первой категории, они достаточно просто компенсируются геометрически, при наличии информации о движении камеры [1–2]. В статье автор описывает подход к решению этой задачи, используя лишь данные видеоряда и некоторую информацию о камере.



Рис. 1. Искажения порождаемые эффектом "скользящего затвора"

Потребность в алгоритме компенсации искажений скользящего затвора трудно переоценить, поскольку большинство современных фотоаппаратов, видеокамер и мобильных телефонов оснащены матрицами именно такого типа. Разработками в данном направлении занималось большое количество ученых. В частности Per-Erik Forssen и Erik Ringaby [1] построили алгоритм, на основании метода KLT [3], который используется для слежения за объектами видео. С его помощью находится матрица движения камеры, после чего очередной кадр искривляется для компенсации эффекта. Alexandre Karpenko, David Jacobs, Jongmin Baek и Marc Levoy [2] для получения информации о движении камеры использовали МЭМС гироскоп, который был предварительно откалиброван, используя SIFT [4] и RANSAC [5]. Такой подход позволяет минимизировать вычисления и сделать алгоритм независимым от данных с камеры. Стоит отметить, что все выше перечисленные методы компенсируют только искажения, вызываемые движением камеры. В процессе их выполнения можно выделить три этапа: предварительная калибровка, поиск движения камеры и искривление кадра для компенсации.

Для решения задачи автор предлагает использовать метод поиска движения камеры [6], поскольку его быстродействие и устойчивость полностью удовлетворяют поставленной задаче. Предполагается, что время полного снятия информации с кадра может изменяться и поэтому оно находится на ряду с тремя углами Эйлера при поиске движения камеры. Предполагается, что все параметры камеры известны. Такие условия позволяют избежать предварительной калибровки.

1. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Быстродействие алгоритма является одним из важнейших критериев, поскольку использоваться он будет в большинстве случаев на непроизводительных процессорах в режиме реального времени, приблизительно 30 раз в секунду. Поэтому для выделения точек используется алгоритм на базе оператора Кэнни (рис. 2). На первом этапе находятся все границы, градиент которых больше градиента соседних точек по его направлению. Тем самым выделяются устойчивые границы. Среди них нужно выделить устойчивые точки. Экспериментально было найдено функцию

$$P(p) = \sum_{n \in N} (g_x g_{ny} - g_y g_{nx}),$$

где (g_x, g_y) — градиент в проверяемой точке, (g_{nx}, g_{ny}) — градиент в точке из окрестности, N — множество близлежащих граничных точек. Ее экстремумы не только устойчивы, но относительно равномерно разбросаны по изображению, что положительно отражается на последующих этапах алгоритма.

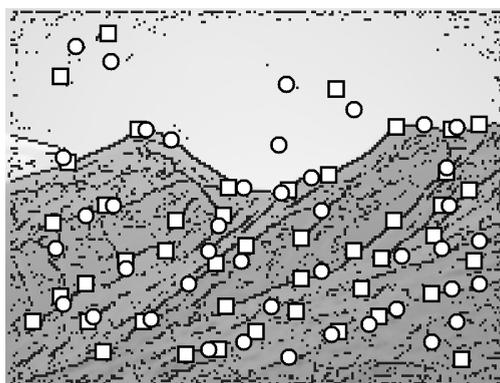


Рис. 2. Выделение границ и ключевых точек

Следующим этапом регистрации есть построение вектора признаков для каждой из найденных точек. Автор использует модифицированный вариант метода, предложенного в [4]. Для начала строится 32-элементная гистограмма ориентаций градиентов в окрестности точки. Среди ее элементов выбирается максимальный, его положение уточняется по значениях соседей. Все дальнейшие расчёты проводятся относительно, определенной таким образом, ориентации ключевой точки. Вектор признаков формируется как последовательность 8-элементных гистограмм ориентаций, каждая из которых рассчитывается в окрестности одной из 12 точек, фиксированных относительно ключевой. Для устойчивости алгоритма к перепадам яркости найденный вектор нормируется.

Описание точек 96-элементными векторами признаков позволяют для двух изображений провести сопоставление на основании Эвклидовой метрики. Рациональным способом выполнить такую задачу можно с помощью использования структуры данных KD-дерево, а в качестве алгоритма поиска выбрать VBF [7]. Выбранное дерево является бинарным и в каждом узле делит точки пополам в измерении с наибольшим разбросом. Операция выполняется до тех пор, пока на очередной ветви не останется одна точка, такую ветвь будем считать листом. Во время поиска сначала находится лист, куда попадает запрос и первым приближением считается точка, соответствующая найденному листу. Оказывается, найденная точка в большинстве случаев не является ближайшей к запросу, поэтому следует проверить все листья, в которых может располагаться точка, которая находится ближе к запросу. В сравнении с обычным поиском в алгоритме VBF производится сортировка кандидатов с помощью очереди с приоритетами, что позволяет значительно быстрее получить искомое значение. По точкам первого изображения строится выше описанное дерево, а точки второго поочередно ищутся в нем. Было замечено, что корректность построения пары для очередной точки второго изображения связана с отношением расстояний до двух ближайших точек из дерева [4]. Откидывая точки с большим значением описанного отношения, проводится первая фильтрация пар.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Процесс получения изображения в камере рассматривается в рамках модели стенопа, то есть выполняется центральная проекция окружающего пространства на прямоугольник в плоскости. Размер и положение прямоугольника определяется параметрами камеры, в частности углами обзора. Для полного описания перемещения камеры от кадра к кадру необходимо 6 значений — 3 Эйлеравых угла поворота и 3 координаты смещения. При использовании такой модели возникает множество проблем: низкая точность определения смещения; необходимость применять к разным объектам различные компенсации, что ведет к разрыву изображения; медленный поиск параметров модели; необходимость большого числа ключевых точек на этапе регистрации. Устранение всех перечисленных недостатков возможно благодаря предположению, что камера (точнее ее центр проекции) остается неподвижной в пространстве. В этом случае количество параметров снижается до 3 углов. Такое предположение возможно благодаря тому, что большинство резких изменений изображения вызывается изменением углов поворота камеры. В [1] было доказано, что модель с 3-мя углами дает лучший результат чем модель с 6-ю параметрами.

Ограничивая перемещение камеры выбранной моделью, можно проверить пары пар точек, которые одновременно не могут ее удовлетворять с одинаковыми параметрами. Пусть проверяются пары (a_1, b_1) и (a_2, b_2) , где a_1, a_2 — точки первого изображения, а b_1, b_2 — второго. Тогда углы, под которыми видно отрезки a_1a_2 и b_1b_2 с определенной точностью ε , будут равны, то есть

$$|\rho(a_1, a_2) - \rho(b_1, b_2)| < \varepsilon.$$

Исходя из этого, попарно перебираем все пары точек и отмечаем сколько раз для каждой из пар не выполнялось неравенство. Если пара определена некорректно, то количество ошибок для нее будет гораздо больше чем количество ошибок правильно определенной пары. Таким образом, постепенно откидываем пары с наибольшим количеством несовместимостей. В результате остается группа пар, для которых попарно выполняется рассматриваемое неравенство.

Конечной целью этого этапа есть поиск изменения углов камеры между кадрами. Классическим подходом к решению данной проблемы есть применение алгоритма Левенберга-Марквардта для минимизации ошибки отклонения:

$$\sum_i \left| \frac{(x_i^1, y_i^1, 1)^T}{|x_i^1, y_i^1, 1|} - R(\alpha, \beta, \gamma) \frac{(x_i^2, y_i^2, 1)^T}{|x_i^2, y_i^2, 1|} \right|^2 \rightarrow \min_{\alpha, \beta, \gamma}$$

где $((x_i^1, y_i^1), ((x_i^2, y_i^2))$ — пары точек, а R — матрица поворота. При таком решении не используется специфика преобразования, следствием чего является не достижение максимальной скорости расчетов. Предлагается использовать метод описанный в [6], основная идея которого состоит в том, что задача итеративного трехмерного поиска на каждом шаге рассматривается как задача поиска на плоскости. В соответствии со значениями углов

на предыдущем шаге точки второго изображения проектируются на плоскость первого, на которой и ведется оптимизация методом наименьших квадратов. Далее согласно найденному преобразованию модифицируется проекция центра второго изображения и как следствие углы Эйлера (рис. 3). Быстрая сходимость схемы и несложные расчеты на каждом шаге делают алгоритм применимым в режиме реального времени.

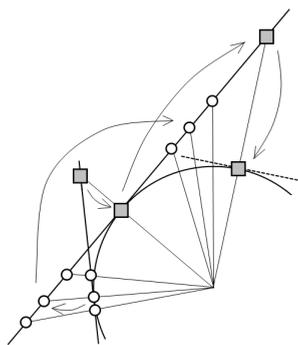


Рис. 3. Оптимизация на плоскости

3. КОМПЕНСАЦИЯ ИСКРИВЛЕНИЯ

Процесс съемки видео состоит из отдельных кадров, частота которых колеблется от 25 до 30 герц, то есть один кадр снимается за 30–40 мс. В КМОП матрицах некоторую часть этого времени занимает получение данных, начиная с верхней строчки, заканчивая нижней. Эффект скользящего затвора вызван этим интервалом и пропорционален его длине. Для устранения проблемы необходимо зафиксировать момент времени и перенести строки изображения на места, где они были в то время.

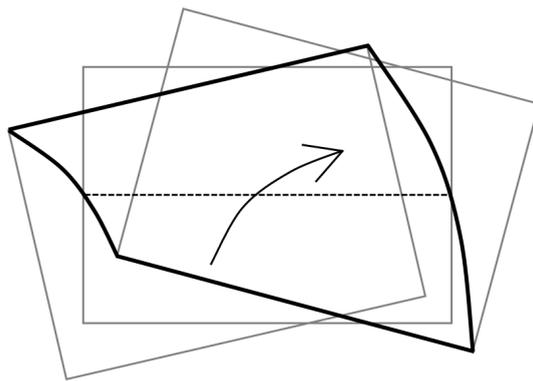


Рис. 4. Формирование кадра

Зафиксируем время съемки центральной точки изображения. Пусть известны: угловая скорость — (α, β, γ) , количество времени съемки кадра от

времени между кадрами — $k \in [0, 1]$, размеры изображения — (w, h) , положение точки на изображении — (x, y) , $x \in [-\frac{w}{2}; \frac{w}{2}]$, $y \in [-\frac{h}{2}; \frac{h}{2}]$. Тогда новое положение (x'', y'') можно записать так:

$$(x', y', z')^T = R \left(\alpha k \frac{2y}{h}, \beta k \frac{2y}{h}, \gamma k \frac{2y}{h} \right) (x, y, 1)^T,$$

$$(x'', y'')^T = \begin{pmatrix} x' & y' \\ z' & z' \end{pmatrix}^T.$$

Пользуясь полученной формулой, можно компенсировать эффект скользящего затвора (рис. 4). Проблема состоит в том, что значение k не известно и в алгоритме поиска углового отклонения не бралось во внимание компенсируемое искажение. Для определения значения k воспользуемся градиентным методом, а поиск угловой скорости для компенсированных изображений будет находиться в пределах каждой итерации. Начальное значение отклонения и коэффициента k берется из предыдущего кадра.

На многопроцессорных устройствах можно находить отклонение изображения сразу от нескольких предыдущих изображений, что пропорционально увеличит точность результата.

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При известных параметрах камеры предложенный алгоритм не требует дополнительной калибровки, что его качественно отличает от описанного в [1]. Так же в сравнении с ним предложенный подход использует более совершенный и устойчивый алгоритм поиска движения камеры, что дает большую устойчивость при быстрых перемещениях.

Метод описанный в [2] принципиально отличается от разработанного алгоритма тем, что для его функционирования нужен гироскоп. Он позволяет свести расчеты практически к нулю и повысить точность. К сожалению, на данный момент большинство устройств им не укомплектованы, исключения составляют мобильные телефоны верхней ценовой категории. Стоит заметить, что для эффективной работы метода гироскоп должен быть жестко связан с камерой, то есть он не будет работать при наличии оптической стабилизации.

Наличие калибровки в упомянутых методах не позволяет применять их для обработки ранее снятого видео, тогда как описанный здесь подход дает такую возможность.

Выводы

Наличие гироскопа на борту дает возможность без проблем компенсировать различные недостатки, такие как эффект скользящего затвора и дрожание камеры при съемке с рук. Его отсутствие передает всю нагрузку на процессор, этим самым увеличивая нагрев и уменьшая заряд батареи. Скорость работы современных процессоров достигла тех показателей, при которых стаёт возможным внедрение таких вычислительно "тяжелых" алгоритмов в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forssen P.-E., Ringaby E. Rectifying rolling shutter video from hand-held devices // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2010. — P. 507–514.
2. Karpenko A., Jacobs D., Baek J., Levoy M. Digital video stabilization and rolling shutter correction using gyroscopes // Stanford Computer Science Tech Report CSTR 2011-03. — 2011.
3. Lucas B., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // International Joint Conferences on Artificial Intelligence. — 1981. — P. 674–679.
4. Lowe D. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. — 2004. — V. 60, Issue 2. — P. 91–110.
5. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the Association for Computing Machinery 24. — 1981. — P. 381–395.
6. Верченко А. П., Кобзар А. Ю. Про один алгоритм побудови панорамних знімків // Вісник КНУ ТШ: серія фізико-математичних наук. — 2011. — №3. — С. 109–114.
7. Beis J., Lowe D. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in highdimensional spaces // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — June 17–19, 1997. — San Juan, Puerto Rico: proceedings. — P. 1000–1006.

ФАКУЛЬТЕТ КИБЕРНЕТИКИ, КИЕВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО, УЛ. ВЛАДИМИРСКАЯ, 64, КИЕВ, 01601,
УКРАИНА.

Поступила 30.10.2013