

Калибровка изображений городской обстановки¹

В.А. Бобков, Ю.И. Роньшин, А.П. Кудряшов

Аннотация. Предложена методика калибровки фотоизображений городской обстановки по последовательности видов, основанная на преимущественной параллельности / ортогональности линий сцены. Описываемая вычислительная схема охватывает этап автоматической векторизации изображений с отбором калибровочных семейств линий и решение задачи внешней калибровки при известных и неизвестных фокусах используемых камер. Особенностью методики является декомпозиция задачи внешней калибровки с реализацией альтернативных локальных решений. Приведены результаты работы с модельными и реальными данными.

Ключевые слова: фотоизображения городской обстановки, калибровка, определение точек схода, эппиполярная геометрия, оптимизация.

Введение

Эффективность активно развиваемых в последнее время методов 3D реконструкции сцен по последовательности некалиброванных видеоизображений в значительной степени определяется эффективностью методов калибровки изображений (видов). Поскольку большой научно-практический интерес в настоящее время приобрела задача автоматической 3D реконструкции архитектурных сцен и создания виртуальных городов, значительная часть разрабатываемых методов калибровки ориентирована на использование специфики таких сцен (преимущественная параллельность / ортогональность пространственных линий объектов), которая реализуется в вычислении так называемых vanishing points (точек схода образов параллельных пространственных линий на 2D изображении). Знание точных значений трех vanishing points (vp) на изображении, отвечающих трем взаимно ортогональным направлениям в системе координат сцены, может существенно облегчить получение параметров калибровки. В частности, это позволяет определить ориентацию камеры по отношению к сцене. Однако

и эта задача (определение vp) не является тривиальной, так как используемые линии несут ошибки предшествующего этапа векторизации исходных изображений. Хорошо известно, что методы оценки структуры и движения в целом очень чувствительны к ошибкам измерений. Поэтому самостоятельное значение приобрела и задача надежного определения vp, решению которой также посвящено много исследовательских работ. Другой важный аспект решения задачи калибровки – определение взаимного положения камер с оценкой эппиполярных ограничений и обеспечением метричности восстанавливаемой структуры (евклидова с точностью до масштаба). Это требует и надежного прослеживания (tracking) точек-особенностей на последовательности видов. Дополнительная неопределенность возникает в предположении неизвестных параметров внутренней калибровки используемых камер (например, неизвестно фокусное расстояние).

В данной работе также предлагается метод определения неизвестных параметров калибровки (положение, ориентация и фокусное расстояние) фотоизображений по последователь-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-07-00113-а) и Программы 14 Президиума РАН

ности видов в контексте 3D реконструкции сцен городской обстановки. Метод ориентирован на автоматическую обработку и устойчивость к влиянию ошибок, связанных с векторизацией фотоизображений и прослеживанием точечных особенностей на видах. Отчасти он является развитием ранее реализованного авторами метода калибровки, основанного на интерактивной привязке смежных видов к системе координат сцены [1]. Последний не удовлетворял условию автоматичности обработки и не обеспечивал желаемой надежности, поскольку зависел от качества интерактивной работы оператора. Описываемый ниже метод опирается как на авторские, так и на известные современные методологические и алгоритмические решения, эффективность которых подтверждена в ряде опубликованных работ.

В [2] был представлен метод 3D реконструкции по одному или двум видам с использованием трех ортогональных семейств параллельных линий. Для вычисления Maximum Likelihood Estimate (MLE) ν здесь использовалась нелинейная минимизация, обеспечивающая наилучшее соответствие варьируемой искомой точки с отвечающим ей семейством отрезков. Известным эффективным методом анализа направлений ν , который получил распространение в последнее время в различных модификациях, является метод Gaussian Sphere [например, 3, 4]. В [5] для определения ν был применен алгоритм RANSAC-типа. Из множества гипотез (точка пересечения двух линий из семейства) выбирается наилучшая путем оценки их на совместимость с оставшимися линиями. После получения ν отвечающее ей множество линий исключается, и процедура повторяется для определения второй ν . В [6,7] также используется метод Gaussian Sphere и RANSAC для начальной оценки ν . Конечное решение получается применением итеративной взвешенной процедуры оптимизации с привлечением Danish M-estimator. Здесь же авторы предложили методику коррекции вычисляемого фокусного расстояния, основанную на минимизации расхождения взаимной ортогональности направлений, соответствующих ν .

Предлагаемый в настоящей статье метод получения калибровки для последовательности

изображений (видов), объединяя модификации некоторых из рассмотренных выше решений [2,5,6] и авторские алгоритмические решения, характеризуется следующими признаками:

1. Векторизация исходных снимков, основанная на применении модификации Сапу фильтра с учетом тематического контекста и требований последующих этапов вычисления ν и 3D реконструкции. Устранение радиальных оптических искажений.

2. Отслеживание точечных особенностей на последовательности изображений. Для повышения достоверности отслеживания на видах с большим угловым смещением используется избыточная последовательность изображений с последующим выделением опорных кадров.

3. Применение RANSAC-алгоритма для выделения 3-х взаимно ортогональных семейств параллельных отрезков.

4. Вычисление ν и фокусов для каждого вида с применением альтернативных схем: традиционная нелинейная оптимизация методом наименьших квадратов; итеративная взвешенная схема нелинейной оптимизации; схема с предварительным вычислением «средних» линий по облаку ν . В отличие от [4] фокусы предполагаются неизвестными. В отличие от [6] учет взаимной ортогональности направлений, соответствующих ν , осуществляется непосредственно в схеме оптимизации в качестве обязательного условия.

5. Для минимизации накопления ошибки определения взаимного положения на длинной последовательности видов выполняется обработка изображений тройками с перекрытием (1-2-3; 2-3-4; и т.д.).

6. Расщепление задачи определения внешней калибровки (применительно к тройке изображений) на две: вычисление взаимной ориентации камер (в виде кватернионов вращения) и вычисление взаимного положения центров проекций.

7. При решении второй задачи п.6 применяется нелинейная оптимизация с минимизацией эпиполярных отклонений для множества контрольных точек-особенностей (определяемых автоматически). Для начальных приближений эпиполюсов реализована оригинальная процедура, альтернативная вычислению фундамен-

тальных матриц. Она основана на построении эпилиний контрольных точек с использованием вычисленных кватернионов (п.6).

8. Оценка качества полученной калибровки реальных сцен выполняется как через подсчет эпиполярных отклонений для контрольных точек, так и визуально для произвольных точек изображений, задаваемых оператором в интерактивном режиме. Дополнительной оценкой служит оценка эффективности последующей работы «трифокального» алгоритма [8], определяющего при известной калибровке соответствие отрезков на смежных тройках изображений-видов.

Последующий текст статьи организован следующим образом. В разделе 1 дается краткое описание алгоритмической обработки изображений, предшествующей непосредственному вычислению vr и калибровки изображений. В разделе 2 приведена оптимизационная схема вычисления vr и фокусного расстояния для одного вида. В разделе 3 описана методика вычисления взаимной попарной ориентации камер с использованием кватернионов вращения. В разделе 4 представлена методика определения взаимного положения центров проекций камер (для трех смежных видов), завершающая получение метрической калибровки. В разделе 5 обсуждаются результаты проведенных вычислительных экспериментов с модельными и реальными данными.

1. Предварительная обработка

На этом этапе решаются две основные задачи – получение векторной основы опорных изображений и прослеживание точечных особенностей на всей последовательности используемых видов. Поскольку требования к векторной основе при калибровке и при 3D реконструкции сцены различаются, выполняется векторизация изображений в двух вариантах, чтобы наилучшим образом соответствовать цели ее использования.

При векторизации первого типа достаточно фильтрации «коротких» отрезков и спрямления ломаных, образующих прямолинейные отрезки. При векторизации второго типа (предназначенной для этапа реконструкции) дополнительно к

фильтрации, отмеченной выше, обеспечивается: устранение разрывов в линиях; стыковка линий в угловых точках; сохранение главного направления линии на Т-образном пересечении линий. Получение субпиксельной точности формируемых отрезков обеспечивается применением метода наименьших квадратов к цепочке образующих точек.

Отбор семейств отрезков. Для каждого полученного векторного изображения далее решается задача выделения трех семейств линий, соответствующих трем vr (отвечающим трем взаимно ортогональным направлениям в сцене). Делается это с помощью алгоритма RANSAC-типа, который вычисляет начальное приближение каждой из трех vr . Полученные при этом семейства отрезков предназначены для последующей работы оптимизационной схемы вычисления уточненных значений vr . Работа RANSAC-алгоритма организована следующим образом. Вначале оператор указывает на изображении для каждого из трех семейств две линии – представители семейства, задающие нужное направление, поскольку потенциально на изображении может быть много vr указанного типа (здания в сцене могут быть ориентированы произвольно по отношению друг к другу). Это необходимо также и для привязки трех смежных видов к одной и той же тройке ортогональных направлений в сцене. Отметим, что это единственное интерактивное вмешательство оператора во всей схеме калибровки. Предполагается, что в следующей версии системы будет решаться и задача автоматической классификации направлений, как, например, в [4].

На основе случайной выборки пар отрезков формируется множество гипотез относительно положения vr (точка пересечения двух отрезков). Гипотеза считается согласованной, если ее угловое расхождение с отрезком - представителем семейства меньше заданного порога. Для каждой гипотезы, согласованной с первым представителем семейства, вычисляются оценки по всем отрезкам, т.е. делается подсчет inlier-outliers по критерию углового отклонения (или расстояний от концевых точек отрезка до линии, соединяющей середину отрезка с vr). Эксперименты, однако, показали, что при этом возможно включение

ние «ложных» отрезков, т.е. удовлетворяющих вышеуказанному критерию (за счет того, что точка vr -гипотезы лежит на направлении отрезка-представителя семейства), но имеющих другое пространственное направление в сцене. Для фильтрации таких отрезков применяется второй пороговый критерий, формируемый с использованием модели Gaussian Sphere. Согласно этому модельному представлению нормали плоскостей, проходящих из центра камеры через экранные образы отрезков семейства, лежат в одной плоскости сферы (Рис. 1). Эта плоскость строится через два представителя семейства. Отклонение от нее указывает на принадлежность отрезка другому пространственному направлению (заметим, что требуемое для этой модели значение фокусного расстояния берется из метаданных фотоаппарата).

Для наилучшей гипотезы фиксируется поддерживающее ее семейство отрезков. Эти отрезки исключаются из обработки при определении следующего семейства линий.

Следует отметить, что при оценке гипотез возможно применение многопроцессорной обработки для более полного их учета.

Вычислительные эксперименты с разными сценами показали, что в сформированном семействе отрезков возможен значительный разброс точек попарного пересечения линий отрезков, что указывает на плохую векторизацию некоторых отрезков. Поэтому была реализована дополнительная фильтрация для исключения таких отрезков. Фильтрация носит рекурсивный характер и включает следующие основные шаги. Для исходного множества точек попарного пересечения отрезков вычисляется среднее расстояние R между точками этого множества. Определяется наиболее удаленная точка P по отношению к другим. Вычисляется среднее расстояние Q для множества с исключенной точкой P . В качестве критерия оценки компактности множества точек используется величина R/Q . Если она превышает заданный порог, точка P удаляется из множества и процесс повторяется, пока величины R и Q не станут сопоставимыми с точностью до порогового значения. В результате определяются наиболее удаленные точки по отношению к компактному ядру исходного облака точек. Алгоритмический анализ

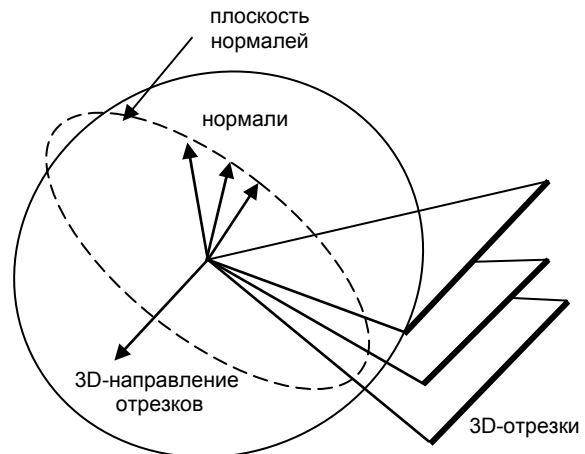


Рис.1. Геометрия параллельных отрезков

этих точек и соответствующих им отрезков позволяет идентифицировать и исключить из семейства отрезки, не вызывающие доверия.

При необходимости окончательные результаты этапа RANSAC-отбора семейств отрезков могут быть откорректированы оператором (удаление/добавление указанных отрезков) в интерактивном режиме.

Установление точечных соответствий. Задача прослеживания точечных соответствий на видах решается в два этапа. Вначале осуществляется поиск особых точек для каждого изображения и формирование дескрипторов с помощью алгоритма SURF (Speeded Up Robust Features) [9]. Полученный дескриптор инвариантен к повороту, изменению яркости, масштабированию изображения и частично к изменению угла наблюдения сцены. Затем для пары изображений сравниваются дескрипторы особых точек методом евклидова расстояния. Среди найденных соответствий отбираются наилучшие по коэффициенту сходства (по заданному порогу). При выборе соответствий учитывается также исправление дисторсии и исключаются точки, лежащие по краям изображений. Размер области, где точки исключаются, зависит от величины дисторсии. Далее выполняется сортировка полученных точек для исключения ложных. Сортировка выполняется по потоку пикселей – векторному полю, где начало каждого вектора – это координаты точки на первом изображении, а конец вектора – координаты соответствующей ей точки на втором. Для каждого вектора определяется сред-

ний угол и средняя длина по векторам, лежащим в окрестности данного вектора. Если угол и длина рассматриваемого вектора больше некоторых пороговых значений, то такой вектор, а, следовательно, и точечное соответствие отбрасывается. Поскольку для больших угловых отклонений между видами приведенная методика может не давать приемлемого результата, применяется также и методика с «избыточной» (по отношению к числу опорных видов) последовательностью изображений. Для длинной последовательности изображений точечные соответствия находятся попарно на соседних изображениях, а затем рекуррентно сравниваются соответствующие координаты точек и при их совпадении составляется список соответствий, который описывает положения особой точки сцены на последовательности изображений. Алгоритм позволяет отсортировать полученные точки по мере сходства и выводить определенное число сопоставленных особенностей с наибольшим коэффициентом сходства, а также выводить только точки, прослеженные на всех заданных изображениях.

Таким образом, выходом этапа предварительной обработки является:

- последовательность видов (растровые изображения) с устранением радиальных искажений;
- дополнительные снимки (1 или более) к каждому виду с «приближением» к сцене (опционно);
- 3 семейства линий для каждого вида, отвечающие 3-м vp (начальные приближения) и предназначенные для последующего этапа уточненного вычисления vp (то же для дополнительных снимков);
- 3 множества контрольных точек, сопоставленных на каждой паре видов (то же для дополнительных снимков);
- набор векторизованных линий для каждого вида, предназначенный для 3D-реконструкции с использованием полученной калибровки.

2. Вычисление vp и фокусного расстояния для одного вида

Исходными данными для вычисления vp являются 3 семейства отрезков для данного вида, полученные на этапе предварительной обработки. Для определения vp используется нелинейная

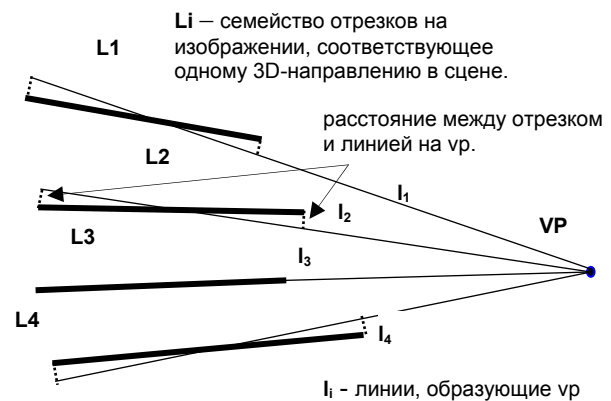


Рис.2. VP определяется как пересечение линий, которые минимизируют суммарное расстояние от конечных точек отрезков семейства до указанных линий

оптимизация с нелинейными ограничениями. Неизвестными являются координаты 3-х vp (6 неизвестных).

Целевая функция – сумма квадратов расстояний между отрезками семейств и линиями, соединяющими эти отрезки и vp (Рис. 2). В качестве ограничений используется системы уравнений:

а) для переменного фокуса:

$$(\mathbf{vp}_1, \mathbf{vp}_2) = (\mathbf{vp}_1, \mathbf{vp}_3)$$

$$(\mathbf{vp}_1, \mathbf{vp}_2) = (\mathbf{vp}_2, \mathbf{vp}_3),$$

б) для фиксированного фокуса:

$$(\mathbf{vp}_1, \mathbf{vp}_2) = f^2$$

$$(\mathbf{vp}_1, \mathbf{vp}_3) = f^2$$

$$(\mathbf{vp}_2, \mathbf{vp}_3) = f^2,$$

которые получаются из условия ортогональности 3D направлений, соответствующих vp_1 , vp_2 , vp_3 . Из этого же условия следует, что $f = \sqrt{-(\mathbf{vp}_i, \mathbf{vp}_j)}$ [8].

Начальное приближение вычисляется как среднее точек пересечений всех пар линий отфильтрованного семейства.

Альтернативой применению рассмотренного выше классического метода наименьших квадратов является итеративная процедура взвешенной оптимизации с использованием Danish M-estimator [7]. Согласно этому подходу на каждом шаге итерации слагаемые приведенной выше целевой функции берутся с весовыми коэффициентами, которые вычисляются по формуле $w(v_i) = e^{-(|v_i|)^2}$ (k-1), где v_i – вектор невязок (residual vector), i – остаточное число, k – номер итерации. В качестве невязки берутся отклоне-

ния линий от направления на vr . Согласно выводам авторов упомянутой статьи для сходимости процесса достаточно 3-10 итераций. Предполагается, что при таком подходе уменьшается влияние больших ошибок на конечный результат. Однако применение этой модификации в настоящей работе существенных улучшений не дало.

В качестве альтернативы вышеописанной схеме вычисления vr и фокуса была предложена и реализована двухшаговая процедура, где на первом шаге вычисляется направление (от центра изображения) на искомую точку- vr , а на втором шаге осуществляется поиск vr на этом направлении с одновременным вычислением фокусного расстояния. Геометрический смысл этой линии-направления заключается в том, что она является инвариантом при изменении фокусного расстояния (это положение иллюстрируется на Рис.3.). Вычислительные эксперименты показали, что для вычисления линии-направления vr можно использовать облако vr -точек, образованное множеством пересечений пар отрезков семейства. Как видно на Рис. 4. облако vr -точек (для модельной сцены, показанной на Рис. 5.) вытягивается вдоль некото-

рой «средней линии», которую и можно рассматривать в качестве приближения линии-направления vr . Непосредственное вычисление «средней линии» выполняется на основе метода наименьших квадратов и предварительной фильтрации облака для исключения точек с большим отклонением. Полученные указанным образом три направления на vr (соответствующие трем ортогональным семействам) используются на втором шаге в процедуре оптимизации с одним варьируемым параметром – фокусным расстоянием, поскольку при заданных направлениях на vr и зафиксированном фокусе однозначно определяются все три vr . Целевая функция та же, что и в первой схеме вычислений. Таким образом, описанная схема позволяет расщепить задачу определения vr на две независимые – определение средних линий и фиксация на них vr с одновременным вычислением фокуса.

Опираясь на полученный результат по использованию «средней линии», авторами была предложена и исследована еще одна методика, основанная на привлечении одного или нескольких дополнительных к обрабатываемому виду снимков, с «приближением» к сцене.

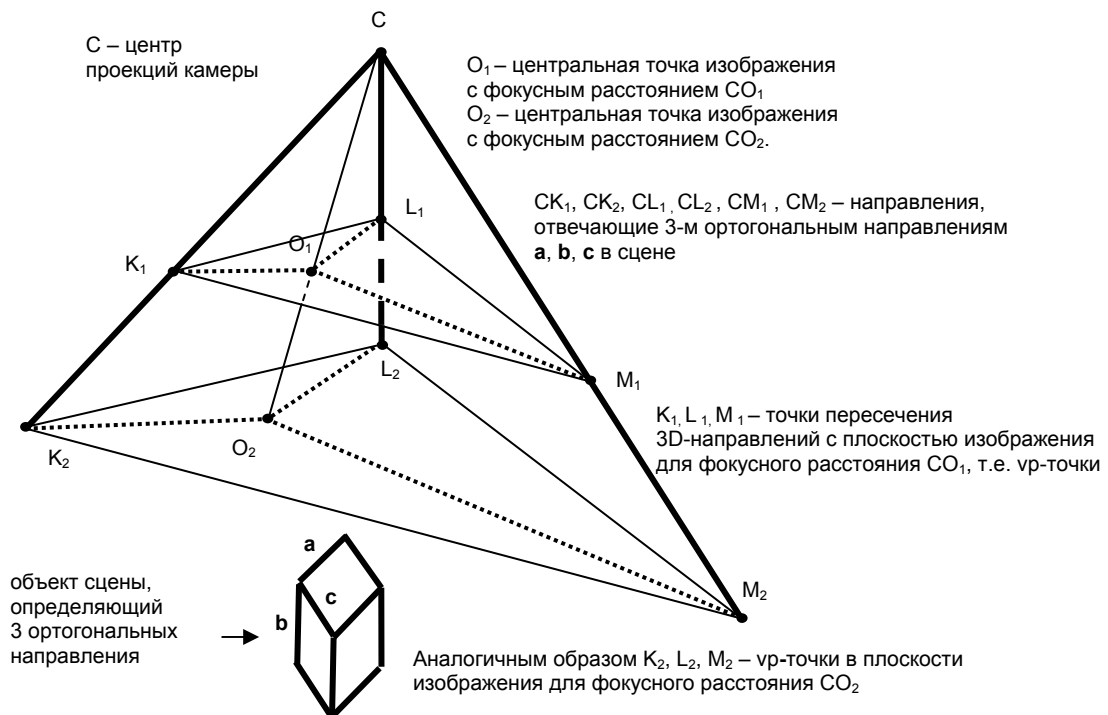


Рис. 3. Геометрия направлений vr (средняя линия) при изменении фокусного расстояния камеры

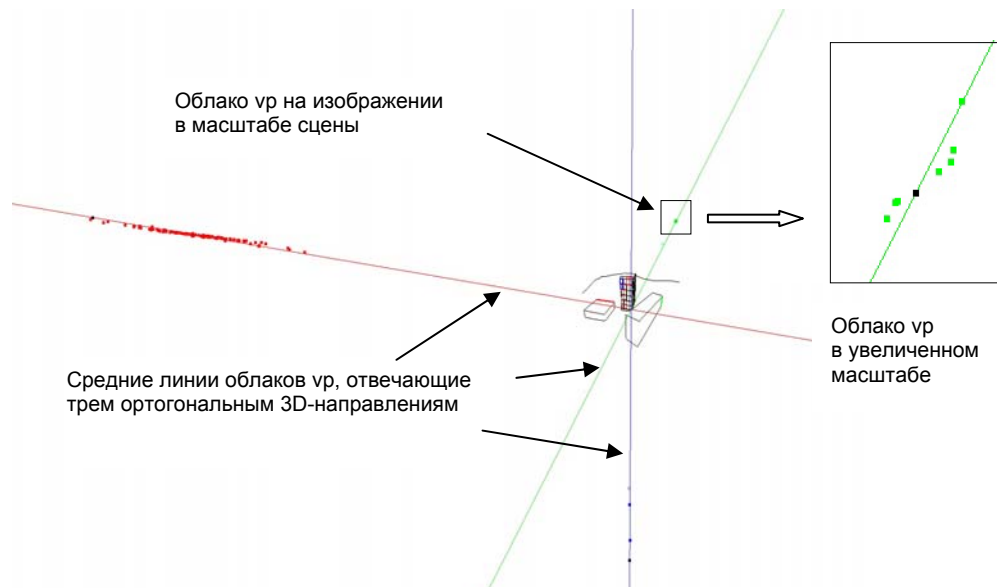


Рис.4. Облака vr-точек и их средние линии

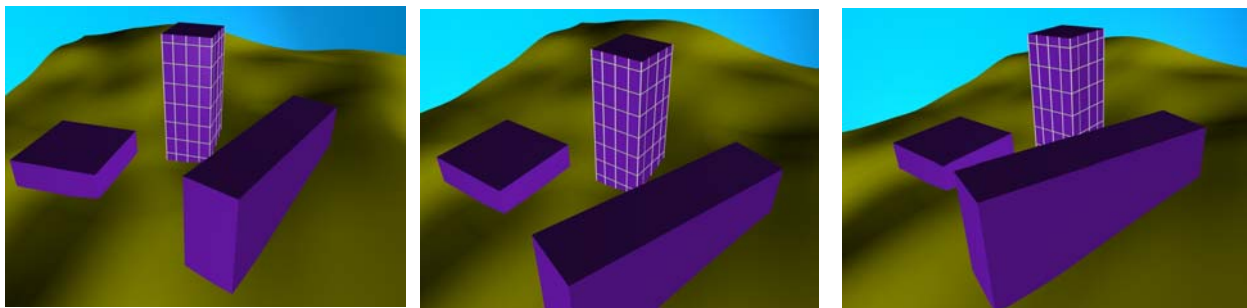


Рис.5. Модельная сцена

Дополнительный снимок к виду делается с увеличенным фокусным расстоянием без изменения положения и ориентации фотоаппарата (т.е. необходима его фиксация на штативе). Идея заключается в том, что обработка дополнительного изображения по описанной выше схеме может позволить более точно (в сравнении с исходным изображением вида) определить направления на vr. Согласно уже отмеченным выше геометрическим ограничениям (Рис. 3) эти направления сохраняются и для исходного изображения вида. Поэтому они могут быть перенесены на исходное изображение и использованы для вычисления vr обрабатываемого вида с помощью вышеописанной двухшаговой процедуры. Заметим, что «средняя линия» может вычисляться не только по облаку vr-точек, но и по основной схеме нелинейной оптимизации с

вариацией vr-точек (Рис.2). Эффективность описанных методик обсуждается в разделе 5.

3. Определение взаимной ориентации камер

Задачу получения внешней калибровки камер будем решать с использованием трех видов. Ее можно определить как нахождение матриц преобразования системы координат (СК) камеры 1-го вида в СК камеры 2-го вида (H_{12}) и в СК камеры 3-го вида (H_{13}). Матрицы ищутся с точностью до масштаба. Они представляются в виде:

$$H = \begin{pmatrix} R & | & 0 \\ \mathbf{t} & | & 1 \end{pmatrix},$$

где R – матрица вращения, \mathbf{t} - вектор переноса СК.

Так как матрицу вращения можно представить некоторым кватернионом, вместо матриц вращения будем использовать кватернионы. Поскольку вращение и перемещение камер не зависят друг от друга, задача разбивается на две последовательные:

- определение кватернионов;
- определение векторов переноса.

Кватернионы и фокусы вычисляются из vp , соответствующих некоторой мировой системе координат (МСК). Если для двух видов известны фокусы и пары vp , соответствующие одной и той же МСК, то можно вычислить кватернион (вращение) из одного вида в другой. Строится пара ортов в СК₁:

$$\begin{aligned} e_1 &= (vp_{1.x}, vp_{1.y}, f) \\ e_2 &= (vp_{2.x}, vp_{2.y}, f). \end{aligned}$$

Аналогично строится пара ортов в СК₂ - e_1' и e_2' .

Результирующее вращение определяется из условия, что e_1 и e_1' , а также e_2 и e_2' задают одни и те же направления в сцене и вычисляется как произведение:

$$q = q_1 q_2,$$

где q_1 – вращение, переводящее e_1 в e_1' ; q_2 – вращение, переводящее плоскость (e_1, e_2) в плоскость (e_1', e_2') .

4. Определение взаимного положения камер

Полагается, что на предыдущем этапе определены и зафиксированы фокусы: f_1, f_2, f_3 и кватернионы q_{12}, q_{23}, q_{31} .

4.1. Определение векторов переноса из эпиполюсов

Векторы переносов (t_{12}, t_{23}, t_{31}) определяются из соответствующих эпиполюсов (e_{12}, e_{23}, e_{31}) при условии:

$$t_{12} + t_{23} + t_{31} = 0. \quad (1)$$

Для заданных эпиполюсов строятся 3 единичных вектора (в СК своих камер):

$$\begin{aligned} v_{12} &= (e_{12.x}, e_{12.y}, f_1) / \|(e_{12.x}, e_{12.y}, f_1)\| \\ v_{23}' &= (e_{23.x}, e_{23.y}, f_2) / \|(e_{23.x}, e_{23.y}, f_2)\| \\ v_{31}'' &= (e_{31.x}, e_{31.y}, f_3) / \|(e_{31.x}, e_{31.y}, f_3)\| \end{aligned}$$

Векторы v_{23}' и v_{31}'' преобразуются в СК 1-ой камеры (* – знак сопряжения):

$$\begin{aligned} v_{23} &= v_{23}' q_{12}^* \\ v_{31} &= v_{31}'' q_{31}^* \end{aligned}$$

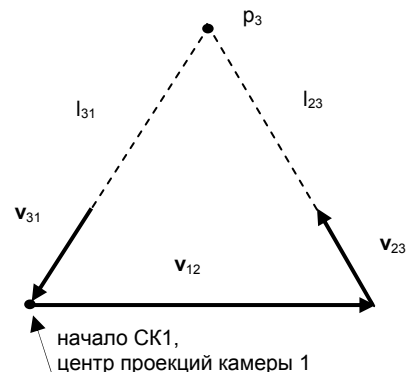


Рис.6. Построение векторов переносов для камер

Если для векторов v_{12}, v_{23}, v_{31} выполняется условие компланарности:

$$(v_{12} \times v_{23}) \times (v_{12} \times v_{31}) = 0, \quad (2)$$

то векторы t_{12}, t_{23}, t_{31} можно определить следующим образом:

- $t_{12} = v_{12}$ (полагается, что калибровка определяется с точностью до масштаба);
- строится вспомогательная линия l_{23} , проходящая через точку t_{12} в направлении v_{23} (Рис. 6);
- строится вспомогательная линия l_{31} , проходящая через точку 0 в направлении v_{31} ;
- p_3 – точка пересечения l_{23} и l_{31} ;
- $t_{23} = p_3 - t_{12}$;
- $t_{31} = -p_3$.

Возможны два варианта определения эпиполюсов.

4.2. Определение эпиполюсов

Вычисление эпиполюсов основывается на минимизации эпиполярных отклонений по множеству сопоставленных точек-особенностей (далее контрольных точек).

По 2-м видам. Эпиполюсы определяются независимо для 3-х пар видов: 1-2, 2-3, 3-1.

Для каждой пары используется нелинейная оптимизация. Неизвестными являются координаты эпиполюса (2 неизвестных). Целевая функция – эпиполярность – сумма квадратов углов между эпиполярными плоскостями Π_i и Π_j по всем контрольным точкам (p_k) между видами i и j . Π_i задаётся вектором v_{ij} в СК i -той камеры и вектором $(p_k^i.x, p_k^i.y, f_i)$. Π_j задаётся тем же вектором v_{ij} и вектором $(p_k^j.x, p_k^j.y, f_j)$, преобразованным в СК i -той камеры соответ-

вующим кватернионом (Рис. 7). Другой способ оценки эпиполярности – обычно выполняемое вычисление расстояний от контрольных точек до соответствующих им эпилиний непосредственно в плоскости изображения.

По 3-м видам. Определяются эпиполусы для 3-х видов. Используется нелинейная оптимизация с нелинейными ограничениями. Неизвестными являются координаты эпиполусов (6 неизвестных). Целевая функция – эпиполярность – сумма 3-х попарных целевых функций. Ограничение – условие компланарности (2).

Эксперименты показали, что оптимизация дает лучший результат при включении в число контрольных точек т.н. виртуальных точек. В качестве виртуальной точки рассматривается образ третьей камеры, видимый на двух остальных. Направление на него дают соответствующие эпиполусы.

Вычисление начального приближения для обоих вариантов описывается ниже.

4.3. Определение начального приближения для эпиполусов

Методика вычисления начального приближения эпиполусов базируется на следующих положениях: при известной взаимной ориентации двух камер и фокусах (используется кватернионы и фокусы, полученные на первом этапе) возможно построение эпилиний для сопоставленных точек на изображениях; правильные эпилинии пересекаются в одной точке – эпиполусе. Поэтому усреднение облака точек, полученных на попарных пересечениях построенных эпилиний, предположительно дает нам начальное приближение эпиполуса.

Тогда методика сводится к следующей последовательности действий. Для каждой контрольной точки \mathbf{p}_k между видами i и j определяется собственная эпилиния l (Рис.8):

- строится вектор $\mathbf{v}_k^i = (\mathbf{p}_k^i.x, \mathbf{p}_k^i.y, f_i)$ в СК i -той камеры;
- строится вектор $\mathbf{v}_k^j = (\mathbf{p}_k^j.x, \mathbf{p}_k^j.y, f_j)$ в СК j -той камеры;
- вектор $\mathbf{v}_k^{j'}$ преобразуется в вектор \mathbf{v}_k^j в СК i -той камеры соответствующим кватернионом;
- плоскость Π_k задается векторами \mathbf{v}_k^i и \mathbf{v}_k^j ;
- линия l_1 – пересечение Π_k и плоскости XU ;

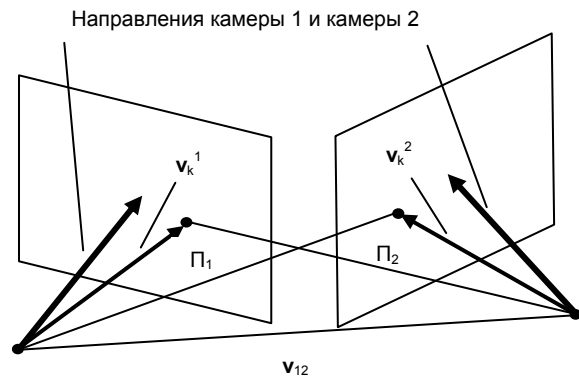


Рис.7. Оценка эпиполярности для контрольных точек

- l – линия, параллельная линии l_1 и проходящая через точку \mathbf{p}_k^i .

Далее строится множество точек попарных пересечений собственных эпилиний.

Геометрический центр этого множества – начальное приближение для эпиполусов.

5. Результаты вычислительных экспериментов

В вычислительном эксперименте с модельной сценой (Рис.5) оценивались как промежуточные результаты – кватернионы и фокусы, полученные на первом этапе, так и вектора переносов \mathbf{t}_{12} , \mathbf{t}_{23} , \mathbf{t}_{31} с оценкой эпиполярности по контрольным точкам – на втором этапе. Сравнение делалось с известными для модельной сцены значениями оцениваемых параметров. Для оценки точности кватернионов вычислялось среднее угловое отклонение тройки ортов, преобразованной вычисленным кватернионом по отношению к преобразованию, выполненному истинным кватернионом. Ниже приведены полученные результаты калибровки для модельной сцены.

Истинные фокусы $f_1 = f_2 = f_3 = 36$. Вычисленные значения фокусов $f_1 = 35.9687$,

$f_2 = 35.9977$, $f_3 = 35.9702$. Среднее угловое отклонение q_{ij} (в градусах) для преобразуемой тройки ортов, т.е. усредненная ошибка для кватерниона между видами i, j :

$$q_{12}=0.0197005, q_{23}=0.0141796, q_{31}=0.0241855.$$

Истинные эпиполусы: $\text{epip}_{12} = (50.15, 33.78)$, $\text{epip}_{23} = (-102.04, 176.30)$.

Вычисленные эпиполусы: $\text{epip}_{12} = (48.97, 33.18)$, $\text{epip}_{23} = (-98.61, 171.41)$.

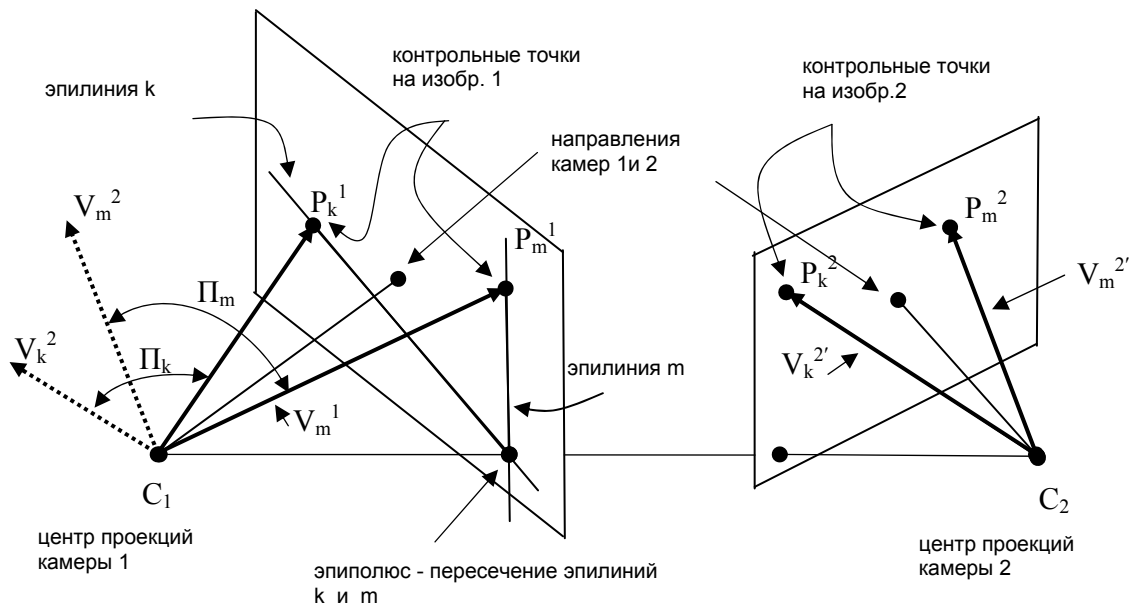


Рис. 8. Вычисление начального приближения для эпилюса

Ошибка эпиллярности, т.е. усредненное (по 20 контрольным точкам на каждом виде) эпиллярное отклонение, оценивалась двумя способами:

а) усредненный подсчет углов (в градусах) между эпиллярными плоскостями Π_i и Π_j по всем контрольным точкам (п. 4.2.):

$$\text{СреднКвадрОткл} = 0.0046;$$

$$\text{СреднОткл} = 0.0253; \quad \text{МаксОткл} = 0.1076;$$

б) вычисление усредненного расстояния от контрольных точек до соответствующих эпиллиний (в пикселях):

$$\text{СреднКвадрОткл} = 0.1598;$$

$$\text{СреднОткл} = 0.8766; \quad \text{МаксОткл} = 3.8258.$$

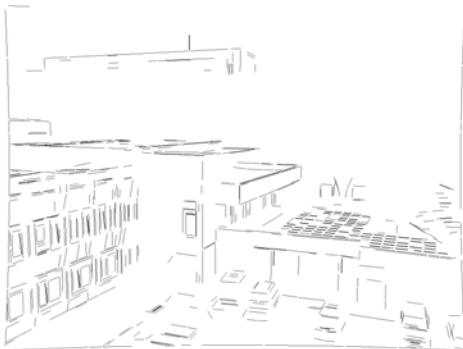
Как видно из приведенных результатов, все параметры калибровки вычислены с высокой точностью, чему, безусловно, способствовало отсутствие дефектов и помех, присущих реальной съемке. Применение методики с использованием дополнительных видов с приближением и переносом средней линии дало примерно такие же оценки по точности. Этот результат был ожидаем, поскольку в обоих случаях определяющим было высокое качество векторизации изображений модельной сцены.

В отличие от модельной для реальной сцены возможны только косвенные оценки правильности выполненной калибровки. Поэтому в проведенном вычислительном эксперименте с реаль-

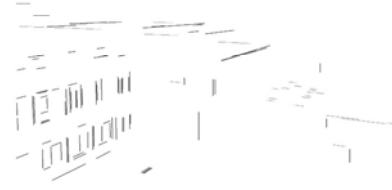
ной сценой (Рис.9) в качестве такой оценки использовалась: оценка эпиллярности для контрольных точек (в процессе оптимизации); визуальная оценка эпиллярности для произвольных точек изображений, указываемых оператором в интерактивном режиме; оценка эффективности отработки «трифокального» алгоритма сопоставления отрезков на видах с использованием полученных параметров калибровки. Фотоизображения были получены фотоаппаратом, который условно можно отнести к классу любительских, поэтому применение стандартных методик для оценки aberrаций выявило наличие разного рода искажений (дисторсия, хроматическая aberrация, смещение центра изображения). Безусловно, это повлияло на качество получаемой калибровки даже при попытке учета эти искажений. Поскольку точность калибровки очевидным образом зависит от качества векторизации, были проведены тесты и с разным качеством векторизации исходных изображений. При проведении тестов делалась также сравнительная оценка применения разных методик, описанных выше, и вариантов их комбинаций. Во-первых, на предварительном этапе оценивались результаты работы RANSAC-алгоритма по отбору на каждом виде 3-х семейств линий (Рис. 9 б, в), соответствующих выбранному ортогональным 3D направлениям в сцене. Для приведенной сцены отбор семейств



а) виды сцены



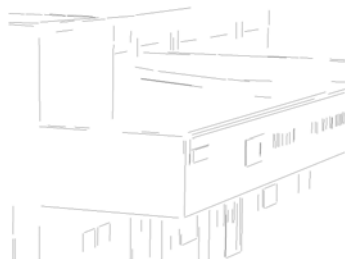
б) векторизованный вид



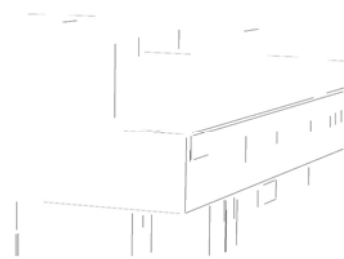
в) линии, отобранные RANSAC-алгоритмом



г) дополнительный вид с приближением к сцене



д) векторизованный дополнительный вид



е) линии на дополнительном виде, отобранные RANSAC-алгоритмом

Рис. 9. Пример реальной сцены

линий был выполнен без видимых ошибок для разных вариантов векторизации, за исключением линий, принадлежащим помехам (автомобили и пр.). Далее было проведено тестирование для двух вариантов (за счет вариации настроечных параметров) векторизации сцены. В каждом варианте проверялись два режима – в предположении неизвестных фокусов и для фиксированных значений фокусов (из метаданных фотоаппарата). В целом второй режим дал лучший и более устойчивый к ошибкам векторизации результат.

Ниже приведены результаты для второго режима.

Вариант векторизации 1.

а) отработка основной методики на множестве линий, отобранных RANSAC-алгоритмом (без исключения линий-помех):

Ошибка эпиполярности (пикс):

СреднКвадрОткл = 3.7, СреднОткл = 13.4, максимальное отклонение = 94.3 (ширина изображения 3072 пикселей).

б) то же после исключения линий-помех (интерактивное вмешательство оператора):

СреднОткл = 6.9,
в) для методики с переносом «средней линии»:

СреднОткл = 9.0

Вариант векторизации 2.

а) отработка основной методики на множестве линий, отобранных RANSAC-алгоритмом, без исключения линий-помех:

Ошибка эпиполяльности (пикс):

СреднКвадрОткл = 0.5, СреднОткл = 1.9,
максимальное отклонение = 9.4

б) то же после исключения линий-помех (интерактивное вмешательство оператора):

СреднОткл = 2.3,

в) для методики с переносом «средней линии»:

СреднОткл = 9.2

Проведенные эксперименты показали, что результат калибровки устойчив к небольшим изменениям качества векторизации при применении основной методики (в режиме фиксированных фокусов) и методики с переносом «средней линии». Применение методики с переносом «средней линии» (использование изображений с приближением) дает лучший результат в сравнении с вариантом работы только с исходными видами, где проявляется чувствительность и к ошибкам векторизации и к вычислению фокусного расстояния. Однако исключение линий-помех на исходных видах позволяет существенно улучшить результат калибровки. Увеличение количества контрольных точек, равномерно распределенных по площади изображения, также позволяет уменьшить ошибку эпиполяльности.

Дальнейшее совершенствование описанной технологии предполагает улучшение работы RANSAC-алгоритма по отбору «калибровочных» семейств линий, повышение эффективно-

сти алгоритма прослеживания точечных особенностей и более точный учет аберраций используемых фотоаппаратов.

Литература

1. В.А. Бобков, Ю.И. Роньшин, А.П. Кудряшов. Идентификация линий по некалиброванным видам городской обстановки // Информационные технологии и вычислительные системы, №1, 2007, С. 63-71.
2. D. Liebowitz, A. Criminisi, and A. Zisserman. Creating architectural models from images. In Eurographics, volume 18, pages 39--50, 1999.
3. E. Lutton, H. Maitre and J. Lopez-Krahe: Contribution to the determination of vanishing points using Hough transform. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence 16(4), 1994, pp. 430-438
4. Matthew Antone and Seth Teller. [Automatic Recovery of Relative Camera Rotations in Urban Scenes](#), in Proc. CvpR, pp. II-282--289, June 2000.
5. Z. Kim, "Geometry of Vanishing Points and its Application to External Calibration and Realtime Pose Estimation", Institute of Transportation Studies, Research Reports, Paper UCB-ITS-RR-2006-5, July 1, 2006.
6. D. G. Aguilera, M. A. Claro-Isarri, J. Finat, J. Gómez Lahoz, K. Olafsson and F. J. Peña. Año A Comparative Analysis for the Vanishing Points Estimation in Urban Scenes from a Single View: CIPA International Workshop on "Vision techniques applied to the rehabilitation of city centres", pp. 1/6-6/6, 2004.
7. D.G. Aguilera, J.Gomez-Lahoz, J.Finat: A new method for vanishing points detection in 3d re-construction from a single view. Revista: The Intl. Archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences Volumen: "Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures" Vol. XXXVI, Part: 5/W.17 Editores: Sabry El-Hakim, Fabio Remondino, Lorenzo Gonzo Indice de Impacto: 0.389 ISSN: 1682-1777, 2005.
8. В.А. Бобков, Ю.И. Роньшин, А.П. Кудряшов. Сопоставление линий по трём видам пространственной сцены // Информационные технологии и вычислительные системы, №2, 2006, С. 71-78.
9. L.Gool. SURF: Speeded Up Robust Features, ECCV06, 2006, pp. 404-417.

Бобков Валерий Александрович. Окончил Московский физико-технический институт в 1971 году. Доктор технических наук. Автор более 60 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, компьютерное зрение, геоинформатика, обработка изображений и распознавание образов. Заведующий лабораторией машинной графики в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН. Эл. адрес: bobkov@iacp.dvo.ru.

Роньшин Юрий Иванович. Окончил Ленинградский государственный университет в 1977 году. Автор более 20 научных работ. Специалист в области компьютерной графики, компьютерного зрения, системного программирования, параллельных вычислительных систем. Ведущий инженер – программист Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Кудряшов Алексей Павлович. Окончил Дальневосточный технический университет в 2004 году. Автор 4 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, компьютерное зрение, обработка изображений и распознавание образов. Младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН. Эл. адрес: kudryashova@iacp.ru