

© 2021 г. В.А. ФУРСОВ, д-р техн. наук (fursov@ssau.ru),
Е.Ю. МИНАЕВ, канд. техн. наук (eminaev@gmail.com)

(Самарский университет),

А.П. КОТОВ, канд. техн. наук (kotov@ssau.ru)

(Институт систем обработки изображений — филиал ФНИЦ
“Кристаллография и фотоника” РАН, Самара)

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ АППАРАТА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹

Рассматривается задача визуальной одометрии по последовательности видеокладов, которые формируются с использованием направленной перпендикулярно вниз камеры. Предлагается адаптивная двухэтапная технология визуальной одометрии, основанная на последовательном определении межкадровых сдвигов и регулярной корректировке текущих оценок координат. На первом этапе сдвиг между двумя последовательными кадрами определяется корреляционным методом и сопоставляемые видеоклады с использованием найденных параметров сдвига совмещаются с точностью до пикселя. На втором этапе сдвиги уточняются с субпиксельной точностью с использованием метода оптического потока. Для повышения надежности осуществляется отбор наиболее согласованных оценок оптического потока. Приводятся результаты экспериментальных исследований на имеющихся в открытом доступе данных съемок, подтверждающие высокую надежность и точность оценок.

Ключевые слова: визуальная одометрия, корреляционный метод, оптический поток, опорная плоскость, автономная навигация.

DOI: 10.31857/S000523102110010X

1. Введение

Технологии управления движением транспортных средств с использованием средств визуальной одометрии все шире внедряются в практику [1–4]. Методы визуальной одометрии позволяют оценивать положение и ориентацию аппарата с помощью анализа изменений, вызванных движением камеры на последовательности изображений. Примером ранних исследований в этой области является программа исследования Марса НАСА, где визуальная одометрия использовалась для оценки положения марсоходов на пересеченной местности [5, 6].

Традиционные непрямые методы визуальной одометрии [7–9] используют геометрический анализ разреженных соответствующих ключевых точек для определения изменений между входными видеокладами. В таком случае задача визуальной одометрии сводится к задаче минимизации ошибок репроекции.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме FSSS-0777-2020-0017.

Прямые методы визуальной одометрии [10–12], наоборот, стремятся совместно определить плотную (полуплотную) регистрацию изменений входных видеок кадров и параметров модели движения камеры. В результате вычисления плотного поля соответствий между изображениями задача прямых методов сводится к минимизации фотометрической ошибки.

Для прямых методов визуальной одометрии в качестве алгоритмов оценки изменений между изображениями широко используют оптический поток [13] и корреляционные методы [14], для непрямых методов применяют широкий спектр различных детекторов ключевых точек Harris detector [15], SIFT [16], SURF [17], FAST [18] и ORB [19].

В публикации [14] продемонстрирована высокая надежность применения корреляционного метода на реальном маршруте. Однако в корреляционном методе относительный сдвиг определяется с точностью до целого числа пикселей. Возникающие при этом субпиксельные ошибки могут накапливаться и вносить заметный вклад в общую ошибку оценивания траектории. В [20] предпринята попытка преодолеть этот недостаток путем вычисления субпиксельных относительных сдвигов с использованием модифицированного коэффициента корреляции. Модифицированный метод субпиксельной корреляции основан на предположении, что корреляционный отклик убывает по экспоненте. Однако предположения в отношении величины показателя экспоненты при этом могут не выполняться.

В [21, 22] для определения относительных сдвигов использовался оптический поток. Параметры сдвига методом оптического потока в отличие от корреляционного метода могут быть определены с субпиксельной точностью. Однако надежность решений часто оказывается низкой вследствие неизбежных помех и искажений видеок кадров, которые обычно зависят от области локализации используемых фрагментов. Кроме того, методы оптического потока ненадежно работают при больших относительных сдвигах между видеок кадрами, которые являются следствием либо высокой скорости движения аппарата, либо малой скорости регистрации видеок кадров.

Нейронные сети для решения задачи визуальной одометрии [4, 23] показывают высокую точность, однако результаты сильно зависят от наборов данных, на которых обучались сети. Надежность этих методов при незнакомых сценах и условиях съемки не поддается оценке.

Одним из путей повышения точности одометрии является автоматическая калибровка в режиме функционирования по наблюдениям, поступающим от дополнительных источников информации. В частности, в последние годы строятся технологии, основанные на комбинировании нескольких сенсоров и методов обработки наблюдений [13, 24, 25]. Конечно, это связано с существенным возрастанием расходов на установку дополнительных сенсоров, тем не менее такой подход оправдан в случае, когда речь идет о безопасности движения, например в системах управления железнодорожными транспортными средствами, воздушными судами и др.

Таким образом, идея комбинирования сама по себе плодотворна и находит все больше сторонников. Однако представляется, что повышение надежно-

сти путем комбинирования только методов обработки информации без установки дополнительных сенсоров является также перспективным направлением. В рамках этого подхода появляется возможность строить не только более дешевые, но и более компактные системы управления транспортными средствами. В ряде случаев достижение минимальных габаритно-весовых характеристик систем визуальной одометрии является решающим фактором. Идея настоящей статьи состоит в комбинировании методов и алгоритмов на информационном уровне без применения дополнительных аппаратных средств.

Статья построена следующим образом. В разделе 2 рассматривается схема наблюдения и вводится система координат. В разделе 3 описан алгоритм построения оценок с использованием корреляционного метода. В разделе 4 приведен алгоритм субпиксельного уточнения оценок с использованием уравнений оптического потока. В разделе 5 описана общая схема предлагаемой двухэтапной технологии с эпизодической корректировкой текущих оценок параметров траектории. В разделе 6 приведены результаты экспериментальных исследований.

2. Постановка задачи

В последние годы все больший интерес проявляется к системам, в которых последовательность видеок кадров формируется с использованием направленной перпендикулярно вниз камеры [14, 23, 24]. Связано это, по-видимому, с тем, что последовательность изображений поверхности, по которой перемещается аппарат, формируется непрерывно, в то время как при обзоре окружающей сцены на некоторых участках траектории возможны пропуски вследствие отсутствия ориентиров на доступных для камеры расстояниях.

В статье рассматривается задача построения оценок двумерных координат траектории по последовательности изображений, получаемых при движении аппарата по плоской опорной поверхности. В случае летательного аппарата предполагается, что движение осуществляется на одной высоте над заданной плоскостью (в горизонтальном полете — это плоскость местного горизонта). Схема съемки при движении по опорной плоскости показана на рис. 1.

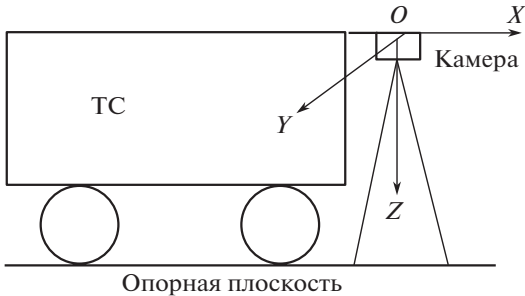


Рис. 1. Схема съемки.

Используем следующую систему координат. Начало системы координат, связанной с камерой, находится в центре фокальной плоскости камеры. Главная оптическая ось камеры направлена на опорную поверхность по перпендикуляру к плоскости в направлении оси Oz (см. рис. 1). Направление оси Ox системы координат, связанной с камерой, совпадает с направлением оси Ox системы координат, связанной с опорной плоскостью. Ось Oy образует правую систему координат.

При движении транспортного средства (ТС) система координат, связанная с камерой, совершает плоскопараллельные перемещения в плоскости, параллельной опорной. Это означает, что при жестком закреплении камеры изменение направления движения аппарата осуществляется без поворота вокруг некоторой оси. Если изменение направления движения аппарата осуществляется путем его поворота вокруг некоторой оси, камера должна стабилизироваться в заданном направлении с помощью специальных (например, гироскопических) устройств.

Для определения траектории в любой другой системе координат должен быть задан закон движения системы координат, связанной с опорной плоскостью, относительно этой системы координат. Не будем касаться этих аспектов и ограничимся задачей построения оценок траектории на опорной плоскости в прямоугольной системе координат, связанной с этой плоскостью.

Траекторию движения будем строить в виде непрерывной ломаной линии, составленной из отрезков прямых, точки *сопряжения* которых соответствуют моментам съемки камерой. Кадры, соответствующие концам каждого отрезка, далее будем называть *смежными*. Предполагаем, что частота съемки достаточно высокая, так что аппроксимация непрерывной траектории ломаной линией удовлетворяет по точности.

При указанном подходе технология визуальной одометрии состоит в определении последовательности относительных межкадровых сдвигов смежных кадров и формировании общей траектории аппарата путем их суммирования. Таким образом, оценки $\hat{x}_k, \hat{y}_k, k = 1, 2, \dots$, текущих координат аппарата в любой точке траектории определяются путем суммирования относительных сдвигов по осям Ox, Oy . Другими словами, текущие координаты траектории в каждой точке являются накопленной последовательностью относительных межкадровых сдвигов $\Delta x_k, \Delta y_k, k = 1, 2, \dots$, во всех предшествующих точках.

При определении сдвигов в каждой точке возможны ошибки, которые накапливаются по мере увеличения длины траектории. Ошибки одометрии имеют различные источники. Например, при использовании корреляционного метода относительные сдвиги могут быть определены лишь с точностью до целого числа пикселей. Свободный от этого недостатка метод оптического потока ненадежен при больших относительных сдвигах. Ошибки одометрии связаны также с отклонениями параметров движения аппарата от значений, при которых осуществлялась калибровка камеры. К сожалению, калибровка на длинных участках траекторий в расчете на средние значения параметров движения не спасает положения. Ошибки, связанные с кратковременными

нарушениями калибровки на малых отрезках траектории, обычно составляют значительную долю общей ошибки.

В настоящей статье для повышения точности и надежности оценок координат авторы предлагают двухэтапную технологию *монокулярной* визуальной одометрии. На первом этапе определяется межкадровый сдвиг корреляционным методом. На втором этапе сдвиги уточняются с субпиксельной точностью с использованием оптического потока. Кроме того, эпизодически осуществляется корректировка текущих оценок координат траектории по оценкам отклонений параметров движения аппарата от калибровочных значений на малых отрезках траектории.

3. Определение относительных сдвигов корреляционным методом

На первом этапе определяется относительный сдвиг кадров корреляционным методом. Для определения относительных сдвигов на каждой k -й паре кадров задается область поиска и определяются параметры сдвига $\Delta x_k(k)$, $\Delta y_k(k)$, $k = \overline{1, K}$, соответствующие максимальным значениям нормированных коэффициентов корреляции

$$(1) \quad K(f, g, k) = \frac{\sum_{(x,y) \in X(k)} (f(x, y) - f^0) (g(x, y) - g^0)}{\sqrt{\sum_{(x,y) \in X(k)} (f(x, y) - f^0)^2} \sqrt{\sum_{(x,y) \in X(k)} (g(x, y) - g^0)^2}},$$

где $f(x, y)$, $g(x, y)$, f^0 , g^0 – функции интенсивности и их средние значения на изображениях k -й пары кадров. В результате получаем оценки

$$(2) \quad \Delta \hat{x}(k), \Delta \hat{y}(k), \quad k = \overline{1, K},$$

сдвигов по осям Ox , Oy соответственно.

Реализация корреляционного метода связана с большим объемом вычислений. Это неизбежная плата за надежность оценок. Объем вычислений в значительной степени зависит от области поиска соответствующего фрагмента. Для сокращения вычислительных затрат применяется адаптивный алгоритм формирования области поиска.

Предполагается, что сдвиг между соседними кадрами не может превышать Δx_{thr} , Δy_{thr} . После каждого очередного определения координат сдвига к полученным абсолютным значениям сдвига (2) добавляются указанные пороговые значения, при этом получаем допустимые границы области поиска по обеим координатам:

$$(3) \quad \Delta x_{bord} = \Delta x(k) + \Delta x_{thr},$$

$$(4) \quad \Delta y_{bord} = \Delta y(k) + \Delta y_{thr}.$$

Эти значения сравниваются с размерами $\Delta x_{bord}(k-1)$, $\Delta y_{bord}(k-1)$ области поиска на предыдущем $(k-1)$ -м шаге определения относительных сдвигов

предшествующих кадров и осуществляется корректировка границ по правилам:

$$(5) \quad \text{если } \Delta x_{bord} > \Delta x_{bord}(k-1), \quad \text{то } \Delta x_{bord}(k) = \Delta x_{bord}(k-1) - 1,$$

$$(6) \quad \text{если } \Delta x_{bord} < \Delta x_{bord}(k-1), \quad \text{то } \Delta x_{bord}(k) = \Delta x_{bord}(k-1) + 1,$$

$$(7) \quad \text{если } \Delta y_{bord} > \Delta y_{bord}(k-1), \quad \text{то } \Delta y_{bord}(k) = \Delta y_{bord}(k-1) - 1,$$

$$(8) \quad \text{если } \Delta y_{bord} < \Delta y_{bord}(k-1), \quad \text{то } \Delta y_{bord}(k) = \Delta y_{bord}(k-1) + 1.$$

Получающаяся в результате прямоугольная область поиска оказывается максимально приближенной к ожидаемым возможным сдвигам. Такой метод формирования области поиска, кроме прочего, придает дополнительную устойчивость к единичным грубым сбоям оценивания сдвига, так как запрещает оценки сдвигов, которые не могут быть объяснены нормальной скоростью движения аппарата.

4. Субпиксельное уточнение сдвигов методом оптического потока

В классической задаче вычисления оптического потока предполагается, что пиксель с интенсивностью $I(x, y, t)$ в точке (x, y, t) кадра переходит к следующему кадру без изменений

$$(9) \quad I(x, y, t) \cong I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t).$$

Если сдвиги $(\Delta x, \Delta y, \Delta t)$ между этими кадрами невелики, то соотношение (9) с помощью ряда Тейлора можно записать как

$$(10) \quad I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t + \tau,$$

где τ – малое значение, связанное с исключением членов высшего порядка. Из (10) с учетом (9) можно записать уравнение

$$(11) \quad I_x \Delta x + I_y \Delta y = -\Delta I_t,$$

где $\Delta I_t = \frac{\partial I}{\partial t} \cong \partial I$.

Уравнение (11) содержит два неизвестных. Особенность настоящей задачи состоит в том, что при отсутствии помех и искажений на изображениях все пиксели должны смещаться на одинаковое расстояние. Поэтому можно записать переопределенную систему уравнений

$$(12) \quad \mathbf{I}_{x,y} \mathbf{\Delta} = \mathbf{I}_t,$$

где $\mathbf{\Delta} = [\Delta x, \Delta y]^T$, \mathbf{I}_t – матрица-столбец размерности $N \times 1$, $\mathbf{I}_{x,y} = [\mathbf{I}_x, \mathbf{I}_y]$ – $(N \times 2)$ -матрица, а \mathbf{I}_x , \mathbf{I}_y , \mathbf{I}_t – $(N \times 1)$ -матрицы, составленные в соответствии

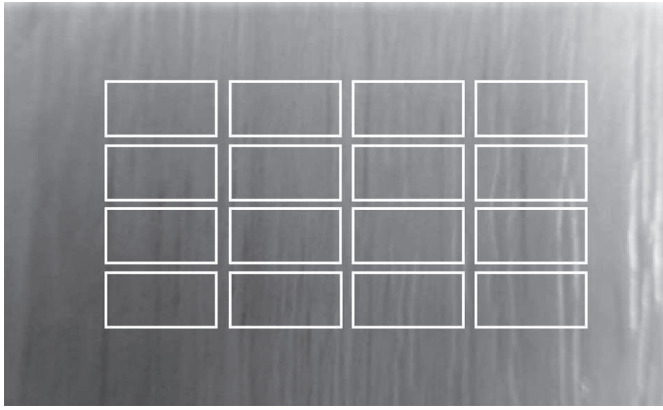


Рис. 2. Пример разбиения на фрагменты.

с соотношениями

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_x &= \left[\frac{\partial I_1}{\partial x}, \frac{\partial I_2}{\partial x}, \dots, \frac{\partial I_N}{\partial x} \right]^T, \\
 \mathbf{I}_y &= \left[\frac{\partial I_1}{\partial y}, \frac{\partial I_2}{\partial y}, \dots, \frac{\partial I_N}{\partial y} \right]^T, \\
 \mathbf{I}_t &= \left[-\partial I_1, -\partial I_2, \dots, -\partial I_N \right]^T.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

В действительности, изображения всегда содержат шумы и искажения. Более того, характер и интенсивность искажений в разных частях изображений могут быть существенно различными вследствие колебаний аппарата во время движения. Для повышения надежности и точности определения относительных сдвигов применяем мультифрагментную схему наблюдения. Пример представления изображения в виде 16 фрагментов приведен на рис. 2.

Идея состоит в следующем. На первом кадре, например k -й пары кадров, зададим L фрагментов по всему полю изображения и определим относительные сдвиги $\Delta x_k(l)$, $\Delta y_k(l)$, $l = \overline{1, L}$, каждого l -го фрагмента на втором изображении. Далее из полученного множества оценок отбирается подмножество наиболее согласованных, для определенности обозначим это подмножество Θ .

Идея построения согласованных оценок была ранее реализована в ряде задач [26, 27]. В данном случае согласованность оценок выступает в качестве признака отсутствия ошибок. Если подмножество Θ существует, то имеем все основания полагать, что это подмножество содержит наиболее точные решения. Нахождение согласованных оценок обычно связано с перебором различных вариантов подмножеств, что требует значительных вычислительных затрат. В данном случае (имея в виду возможность реализации технологии в реальном времени) строим упрощенный алгоритм. В частности, подсчитываем число оценок с разными знаками. Результаты, образующие небольшое число оценок одного знака, исключаются. На оставшемся множестве оценок

ищется подмножество оценок, удовлетворяющее критерию минимума функции взаимной близости оценок [26]. Далее на этом подмножестве может быть построена точечная оценка любым известным методом. Полученные субпиксельные смещения добавляются к найденным корреляционным методом на первом этапе относительным смещениям.

5. Общая схема и алгоритм коррекции оценок координат

Основная проблема при определении текущих координат аппарата методами одометрии состоит в накоплении ошибок по мере увеличения длины траектории. Общая ошибка определения траектории включает ошибки оценивания межкадровых сдвигов, а также ошибки, связанные с тем, что параметры движения аппарата могут отличаться от тех, на которых осуществлялась калибровка камеры. Вариации параметров движения могут иметь место вследствие невозможности обеспечить точное значение заданной скорости в горизонтальной плоскости и точное расстояние от камеры до опорной плоскости. В частности, при колебаниях камеры в направлении оси Oz (см. рис. 1) нарушение калибровки воспринимается как кажущееся изменение горизонтальной скорости. Реальные (или кажущиеся) вариации параметров движения аппарата в окрестности заданного (среднего) калибровочного значения обычно носят кратковременный характер, тем не менее накопление этих ошибок происходит достаточно быстро.

В данной статье предлагается схема коррекции траектории в процессе формирования текущих оценок координат. Идея состоит в построении локальных оценок параметров движения аппарата на коротких отрезках траектории и эпизодическом внесении поправок в текущие оценки координат при их заметном отклонении от калибровочных значений. Здесь и далее полагаем, что длительность малого отрезка траектории $T = m \cdot \Delta t$, где m – заданное число кадров, по которым определяется текущая корректирующая поправка, а Δt – временной интервал между кадрами. Предлагаемая схема коррекции приведена на рис. 3.

Входной информацией в схеме оценки координат траектории с эпизодической коррекцией являются последовательность видеок кадров (блок 1) и ожидаемая средняя скорость, вычисленная по результатам предварительной калибровки камеры. Для простоты полагаем, что интервалы T одинаковы на всей траектории.

В приведенной схеме предлагаемая технология реализуется следующим образом. В блоке 1 с некоторого момента t на каждом такте из видеоследовательности выбирается два очередных кадра. Далее для каждого дискретного $t = k \cdot \Delta t$ определяются межкадровые сдвиги $\Delta \hat{x}_{Korr}(t)$, $\Delta \hat{y}_{Korr}(t)$ корреляционным методом по формуле (2). В блоке 2 осуществляется совмещение кадров путем сдвига второго кадра на найденное число пикселей. Ясно, что при отсутствии грубых ошибок корреляционного метода после совмещения кадров остающийся относительный сдвиг не превышает одного пикселя по любой координате.

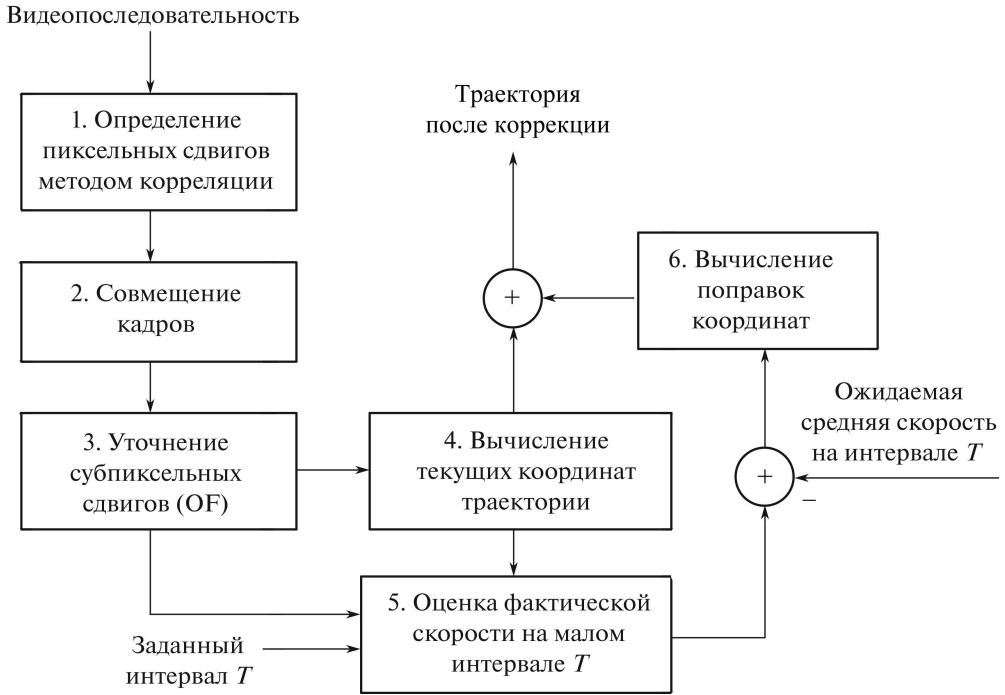


Рис. 3. Схема коррекции оценок координат.

В блоке 3 относительный сдвиг кадров уточняется в пределах одного пикселя методом оптического потока. Найденные по формуле (12) субпиксельные сдвиги $\Delta\hat{x}_{Flow}(t)$, $\Delta\hat{y}_{Flow}(t)$ суммируются со сдвигами, найденными ранее корреляционным методом. В блоке 4 суммарные сдвиги, полученные на текущем такте корреляционным методом и из уравнений оптического потока, суммируются с оценками координат траектории, полученными на предыдущем такте. Таким образом, формируется последовательность отсчетов оценок координат траектории:

$$(14) \quad \hat{x}(t) = \hat{x}(t-1) + \Delta\hat{x}_{Korr}(t) + \Delta\hat{x}_{Flow}(t),$$

$$(15) \quad \hat{y}(t) = \hat{y}(t-1) + \Delta\hat{y}_{Korr}(t) + \Delta\hat{y}_{Flow}(t).$$

Блоки 5 и 6 образуют контур коррекции траектории. В блоке 5 из последовательности межкадровых сдвигов $\Delta\hat{x}(t) = \Delta\hat{x}_{Korr}(t) + \Delta\hat{x}_{Flow}(t)$, $\Delta\hat{y}(t) = \Delta\hat{y}_{Korr}(t) + \Delta\hat{y}_{Flow}(t)$ формируются сдвиги $\hat{x}(T)$, $\hat{y}(T)$ на заданном временном интервале T и с использованием информации о частоте кадров осуществляется оценка текущих локальных скоростей $\hat{V}_x(T)$, $\hat{V}_y(T)$:

$$(16) \quad \hat{V}_x(T) = \hat{x}(T)/T = \left(\sum_{i=t}^{t+T} \Delta\hat{x}(i) \right) / T,$$

$$(17) \quad \hat{V}_y(T) = \hat{y}(T)/T = \left(\sum_{i=t}^{t+T} \Delta\hat{y}(i) \right) / T.$$

Далее определяются отклонения оценок текущей скорости на малом отрезке траектории от заданной средней скорости движения:

$$(18) \quad \Delta V_x(T) = \hat{V}_x(T) - V_{cp},$$

$$(19) \quad \Delta V_y(T) = \hat{V}_y(T) - V_{cp}.$$

С использованием полученных отклонений в блоке 6 в дискретные моменты времени $t = NT$, $N = 1, 2, \dots$, формируются поправки координат траектории, которые затем суммируются с координатами, формируемыми на выходе блока 4. Соотношения, реализуемые блоком 6 и следующим за ним сумматором, с учетом (18), (19) можно представить в виде:

$$(20) \quad \hat{x}_{final}(NT) = \hat{x}(NT) + w_x \cdot \Delta V_x(NT),$$

$$(21) \quad \hat{y}_{final}(NT) = \hat{y}(NT) + w_y \cdot \Delta V_y(NT),$$

где w_x , w_y – весовые коэффициенты, учитывающие выбор системы отсчета, вероятность случайной составляющей ошибок, связанных с нарушениями калибровочных характеристик, диапазоны абсолютных значений отклонений скоростей ТС от среднего значения по осям Ox , Oy и др. Они уточняются на этапе предварительной калибровки.

6. Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментов использовался набор данных Blackbird Dataset [28] для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), перемещающихся в помещениях, на основе специально созданной квадрокоптерной платформы. Набор Blackbird Dataset содержит данные 168 полетов, в каждом из которых регистрируются данные стереокамеры и обращенной вниз фотореалистичной виртуальной камеры с частотой 100 Гц. Известны также наблюдения эталонной траектории с частотой 360 Гц. В настоящей статье используется набор данных полета по траектории “Oval”, включающий 700 последовательных видеокадров. На рис. 4 приведена тестовая траектория в прямоугольной системе координат, построенная по эталонным точкам.

Для простоты полагаем, что все расстояния измеряются в пикселях, а интервал съемки между кадрами $\Delta t = 1$. Поскольку относительные сдвиги определяются по паре кадров, финальная оценка координат определена при $t_{fin} = 699$. Начальные значения координат задавались в соответствии с эталонными данными: $\Delta \hat{x}(1) = -1,412$, $\Delta \hat{y}(1) = -0,325$.

Цель экспериментов состояла в сравнительном исследовании точности корреляционного метода, субпиксельного уточнения оценок методом оптического потока и эпизодической корректировки текущих оценок координат траектории по оценкам отклонений параметров движения аппарата от калибровочных значений на малых отрезках траектории. Поскольку все указанные выше методы являются этапами сквозной технологии, результаты различных методов просто “выводились” на соответствующих промежуточных этапах ее реализации.

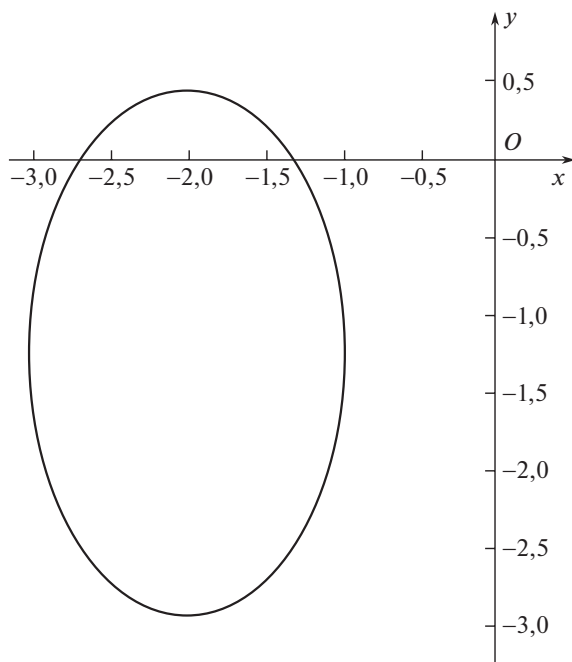


Рис. 4. Эталонная траектория.

На первом этапе определялась точность оценок траектории с использованием корреляционного метода. В этом эксперименте сдвиг второго кадра относительно первого определялся с использованием фрагментов в центре кадра размером 51×51 . Решение принималось по максимальному значению нормированного коэффициента корреляции (1). Область поиска на втором кадре задавалась на каждом шаге в соответствии с соотношениями (5)–(8). Графики зависимости ошибок оценивания координат X и Y корреляционным методом (символом o) приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

Второй этап – субпиксельное уточнение оценок координат методом оптического потока. Для реализации второго этапа второй кадр очередной пары кадров сдвигался “назад” на целое число пикселей, которые предварительно были определены корреляционным методом на первом этапе. Искомые векторы оценок сдвига $\Delta = [\Delta x, \Delta y]^T$ определялись как решения переопределенной системы уравнений (12). Для каждой пары кадров формировалось 16 уравнений (12) для фрагментов с размерами 50×50 , расположенными по полю изображений так, как показано на рис. 2. Далее для каждой координаты из 16 полученных оценок строилась точечная оценка в виде среднего значения множества наиболее согласованных между собой оценок.

С использованием найденных на обоих этапах оценок сдвигов $\Delta \hat{x}_{Korr}$, $\Delta \hat{x}_{Flow}$, полученных корреляционным методом и по уравнениям оптического потока соответственно, определялись оценки координат в каждой точке траектории по соотношениям (14), (15). Начальные значения координат задавались в соответствии с тестовыми данными: $\Delta \hat{x}(1) = -1,412$, $\Delta \hat{y}(1) =$

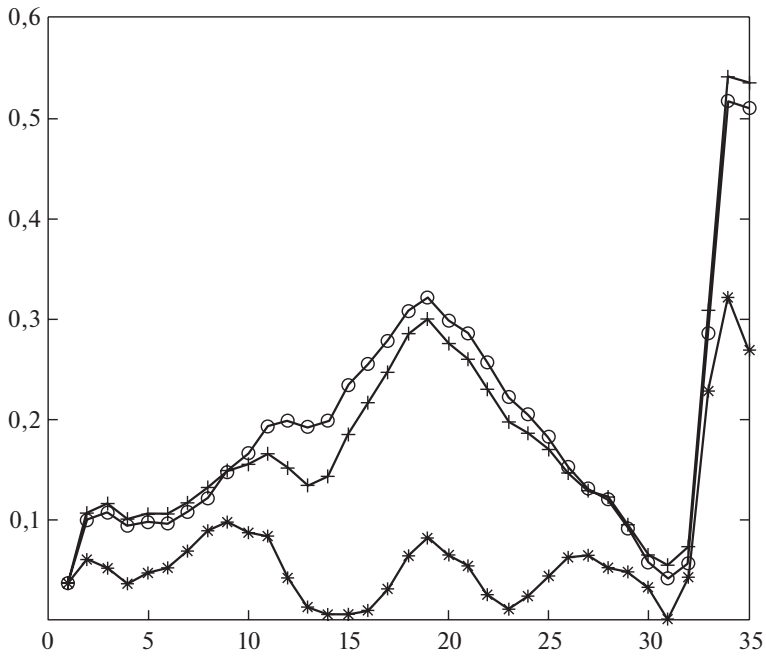


Рис. 5. Графики ошибок оценивания координаты X : корреляционный метод – символ o , с субпиксельной оценкой с эпизодической коррекцией – символ $*$.

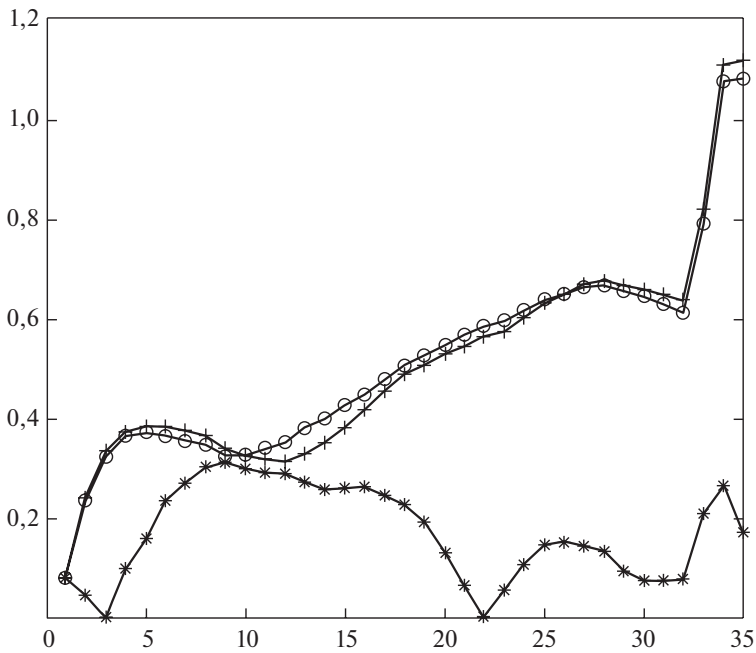


Рис. 6. Графики ошибок оценивания координаты Y : корреляционный метод – символ o , с субпиксельной оценкой с эпизодической коррекцией – символ $*$.

Ошибки оценивания координат траектории

№ п/п	Этапы получения оценок траектории	СКО на всей траектории		Финальные ошибки	
		Координата X	Координата Y	Координата X	Координата Y
1	Метод корреляции (первый этап)	0,2229	0,5564	0,5658	1,2069
2	Субпиксельные оценки (второй этап)	0,2148	0,5572	0,5952	1,2461
3	Результаты после коррекции оценок	0,0975	0,1981	0,3130	0,2516

$= -0,325$. Графики зависимости ошибок оценивания координат X и Y после второго этапа субпиксельного уточнения (символом \times) приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

На завершающем этапе технологии проверялась эффективность предложенной схемы эпизодической коррекции траектории по локальным оценкам параметров движения аппарата на малых отрезках траектории. Для этого осуществили предварительную калибровку средней “цены” одного пикселя фотоприемного устройства (камеры). С использованием точных данных о текущих координатах на тестовом Dataset-е “Овал” подсчитали точный путь на всей траектории

$$S_{\text{sampl}} = \sum_{k=1}^{699} (x^2(k) + y^2(k))^{1/2} = 8,8635 \text{ метров.}$$

Затем построили оценки текущих координат траектории путем реализации описанной в настоящей статье двухэтапной технологии и подсчитали оцененный путь

$$S_{\text{fact}} = \sum_{k=1}^{699} (\Delta \hat{x}^2(k) + \Delta \hat{y}^2(k))^{1/2} = 5509,0 \text{ пикселей.}$$

Вычислили калибровочное значение цены пикселя

$$\Delta S_{\text{cost}} = S_{\text{sampl}}/S_{\text{fact}} = 8,8635/5509 = 0,0016$$

и средней скорости

$$V_{\text{cp}} = S_{\text{sampl}}/t_{\text{fin}} = 8,8635/699 = 0,0126.$$

Для выработки корректирующих сигналов на каждом интервале T по текущим оценкам сдвиг суммировались межкадровые сдвиги на $m = 20$ тактах. Оценки скорости на этих 20-ти тактах определялись по формулам (18), (19). Затем для каждой координаты формировались корректирующие оценки, которые в соответствии с формулами (20), (21) добавлялись к оценкам траектории, полученным до коррекции. При этом задавались весовые коэффициенты $w_x = 10,0$, $w_y = 15,0$.

Графики ошибок оценивания координат X и Y траектории с эпизодической коррекцией (символом $*$) приведены тоже на рис. 5 и 6 соответственно.

В таблице приведены данные о величине среднеквадратических ошибок (СКО) по всей длине траектории, полученные в ходе реализации всех этапов предложенной технологии.

7. Заключение

Реализована сквозная трехэтапная технология, включающая этапы оценки межкадровых сдвигов корреляционным методом, субпиксельное уточнение сдвигов методом оптического потока и коррекцию траектории по текущей информации об отклонениях сдвигов на локальных участках траектории от заданного среднего значения.

Как и следовало ожидать, субпиксельная поправка на втором этапе невелика. Связано это с тем, что после первого этапа совмещаются соседние кадры с точностью до пикселя и поправки не могут быть больше величины пикселя. В то же время фактический полный межкадровый сдвиг в данном примере на некоторых участках достигал около 20 пикселей.

Интересно, что среднеквадратическое отклонение в направлении оси Oy оказалось даже несколько выше (0,5572), чем было на первом этапе (0,5564), хотя визуально из графика на рис. 5 видно, что на большей части траектории ошибка после субпиксельного уточнения все-таки была меньше. Сбой оптического потока произошел на двух последних участках траектории, где действительно кадры оказались “смазанными”.

После завершающего этапа – коррекции оценок траектории – наблюдается существенное увеличение точности оценок координат траектории. Повышение точности носит устойчивый регулярный характер по всей длине траектории. Таким образом, показана эффективность предложенной схемы эпизодической коррекции траектории по текущим оценкам вариаций параметров движения на малых отрезках траекторий в окрестности заданного среднего значения, определяемого предварительной калибровкой камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nister D., Naroditsky O., Bergen J.* Visual Odometry for Ground Vehicle Applications // *J. of Field Robotics*. 2006. V. 23. No. 1. P. 3–20.
2. *Fraundorfer F., Scaramuzza D.* Visual Odometry: Part i: The First 30 Years and Fundamentals // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2011. V. 18. No. 4. P. 80–92.
3. *Fraundorfer F., Scaramuzza D.* Visual Odometry: Part ii: Matching, Robustness, Optimization, and Applications // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2012. V. 19. No. 2. P. 78–90.
4. *Min Z., Yang Y., Dunn E.* VOLDOR: Visual Odometry From Log-Logistic Dense Optical Flow Residuals // *Proc. IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020. P. 4898–4909.

5. *Moravec H.P.* Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover. Ph.D. dissertation, Stanford, CA, USA. 1980.
6. *Matthies L., Shafer S.* Error Modeling in Stereo Navigation // IEEE J. Robot. Autom. 1987. V. 3. No. 3. P. 239–248.
7. *Kitt B., Geiger A., Lategahn H.* Visual Odometry based on Stereo Image Sequences with Ransac based Outlier Rejection Scheme // 2010 IEEE Intelligent Vehicles Sympos. 2010. P. 486–492.
8. *Pire T., Fischer T., Civera J., Cristoforis P., Berles J.* Stereo Parallel Tracking and Mapping for Robot Localization // 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015. P. 1373–1378.
9. *Mur-Artal R., Tardos J.D.* Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // IEEE Trans. Robotics. 2017. V. 33. No. 5. P.1255–1262.
10. *Newcombe R.A., Lovegrove S.J., Davison A.J.* DTAM: Dense tracking and mapping in real-time // 2011 Int. Conf. on Computer Vision. 2011. P. 2320–2327.
11. *Engel J., Schops T., Cremers D.* LSD-SLAM: Large-scale Direct Monocular SLAM // Eur. Conf. on Computer Vision. 2014. P. 834–849.
12. *Kerl C., Sturm J., Cremers D.* Dense Visual SLAM for RGB-D Cameras // 2013 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2013. P. 2100–2106.
13. *Mohamed S.A., Haghbayan M.H., Westerlund T., Heikkonen J., Tenhunen H., Plosila J.* A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems // IEEE Access. 2019. No. 7. P. 97466–97486.
14. *Nourani-Vatani N., Borges P.V.K.* Correlation-based Visual Odometry for Ground Vehicles // J. Field Robotics. 2011. V. 28. No. 5. P. 742–768.
15. *Harris C.G., Pike J.M.* 3D positional Integration from Image Sequences // Proc. Alvey Vis. Conf., Cambridge, U.K. 1987. P. 1–4.
16. *Lowe D.G.* Object Recognition from Local Scale-invariant Features // Proc. Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), Washington, DC, USA. 1999. V. 2. P. 1150–1157.
17. *Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.* Speeded-up Robust Features (SURF) // Comput. Vis. Image Understand. 2008. V. 110. No. 3. P. 346–359.
18. *Rosten E., Drummond T.* Machine Learning for High-speed Corner Detection // Proc. 9th Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV). Berlin, Germany: Springer-Verlag. 2006. P. 430–443.
19. *Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G.* Orb: An Efficient Alternative to SIFT or SURF // Proc. Int. Conf. Comput. Vis. 2011. P. 2564–2571.
20. *Миллер Б.М., Степанян К.В., Попов А.К., Миллер А.Б.* Навигация БПЛА на основе последовательностей изображений, регистрируемых бортовой видеокamerой // АИТ. 2017. № 12. С. 141–154.
Miller B.M., Stepanyan K.V., Popov A.K., Miller A.B. UAV Navigation based on Videosequences Captured by the Onboard Video Camera // Autom. Remote Control. 2017. V. 78. No. 12. P. 2211–2221.
21. *Goppert J., Yantek S., Hwang I.* Invariant Kalman Filter Application to Optical Flow based Visual Odometry for UAVs // 2017 Ninth Int. Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). 2017. P. 99–104.
22. *Muller P., Savakis A.* Flowdometry: An Optical Flow and Deep Learning based Approach to Visual Odometry // 2017 IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV). 2017. P. 624–631.

23. *Gonzalez R., Rituerto A., Guerrero J.J.* Improving Robot Mobility by Combining Downward-looking and Frontal Cameras // *Robotics*. 2016. V. 5. No. 4. P. 25.
24. *Charrett T.O., Waugh L., Tatam R.P.* Speckle Velocimetry for High Accuracy Odometry for a Mars Exploration Rover // *Measurement Science and Technology*. 2009. V. 21. No. 2. P. 025301.
25. *Мясников В.В., Дмитриев Е.А.* Исследование зависимости точности одновременной реконструкции сцены и позиционирования камеры от погрешностей, вносимых датчиками мобильного устройства // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43. № 3. С. 492–503.
26. *Fursov V.A., Kotov A.P., Goshin Y.V.* Solution of Overdetermined Systems of Equations Using the Conforming Subsystem Selection // *J. of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1368. Iss. 5. P. 821–828.
27. *Fursov V.A., Gavrilov A.V., Goshin Y.V.* Conforming Identification of the Fundamental Matrix in the Image Matching Problem // *Computer Optics*. 2017. V. 41. No. 4. P. 559–563.
28. *Antonini A., Guerra W., Murali V., Sayre-McCord T., Karaman S.* The Blackbird Dataset: A Large-scale Dataset for UAV Perception in Aggressive Flight // *Int. Sympos. on Experimental Robotics*. 2018. P. 130–139.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 20.01.2021

После доработки 26.03.2021

Принята к публикации 30.06.2021