© 2022 г. Е.Ю. МИНАЕВ, канд. техн. наук (eminaev@gmail.com), Л.А. ЖЕРДЕВА (lara.zherdeva.taskina@gmail.com) (Самарский университет), В.А. ФУРСОВ, д-р техн. наук (fursov@ssau.ru) (Институт систем обработки изображений — филиал ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Самара)

# ВИЗУАЛЬНАЯ ОДОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С МАЛЫМИ МЕЖКАДРОВЫМИ ПОВОРОТАМИ

В работе рассматривается задача визуальной одометрии по последовательности видеокадров, которые формируются с использованием камеры, направленной перпендикулярно вниз на опорную поверхность. Задача решается в предположении, что частота съемки велика, поэтому параметры межкадрового поворота и сдвига невелики. Технология реализуется в виде последовательности следующих этапов: определение сдвига и поворота с точностью до целого числа пикселей с использованием корреляционного метода, уточнение параметров сдвига и поворота методом оптического потока и коррекция ошибок оценивания, связанных с неравномерностью движения и флуктуациями расстояния камеры до опорной поверхности путем оценки отклонений локальных калибровочных характеристик от их средних значений. Приводятся результаты экспериментальных исследований технологии на тестовых траекториях, полученных путем моделирования движения аппарата по опорной поверхности.

*Ключевые слова*: визуальная одометрия, опорная поверхность, последовательность кадров, моделирование.

DOI: 10.31857/S0005231022100026, EDN: AJTRMC

### 1. Введение

Системы визуальной одометрии [1–4], в которых последовательность видеокадров формируется с использованием камеры, направленной перпендикулярно вниз (на опорную поверхность) в последние годы завоевывает все большую популярность [5–10]. Возможно, это связано с тем, что не всегда есть надежные ориентиры в окружающих сценах, в то время как опорная поверхность наблюдается непрерывно. Например, в работе [11] приведен пример удачной реализации системы, основанной на корреляционном методе.

В [12] авторы настоящей работы предложили технологию визуальной одометрии по последовательности изображений опорной поверхности, регистрируемых БПЛА с малой высоты. Технология включает три этапа: определение сдвига и поворота с использованием корреляции фрагментов (1), уточнение параметров сдвига и поворота методом оптического потока (2) и коррекция ошибок оценивания траекторий, связанных с неравномерностью движения и флуктуациями высоты (3). Предполагалось, что камера установлена в гироподвесе и сохраняет ориентацию относительно глобальной системы координат в течение всего полета.

Эксперименты подтвердили эффективность предложенной технологии. Однако попытка реализации этой технологии в случае жестко закрепленной на корпусе аппарата камеры натолкнулась на принципиальные трудности. Дело в том, что в этом случае необходимо оценивать не только межкадровый сдвиг, но и параметры поворота. Для их определения обычно строят последовательные оценки матриц сдвига и поворота по соответствующим точкам соседних кадров. Для этого кадры должны иметь значительные перекрытия, что достигается увеличением частоты съемки.

Известны различные подходы к решению задачи определения матрицы сдвига и поворота. В частности, непрямые методы визуальной одометрии [13–15] используют анализ соответствующих ключевых точек. По координатам этих точек определяется фундаментальная матрица и затем формируется матрица сдвига и поворота. Известны также алгоритмы построения матрицы сдвига и поворота непосредственно по ключевым точкам. Этот подход в рамках технологии, основанной на использовании изображений опорной поверхности, иногда оказывается неработоспособным, так как эти изображения часто представляют собой некоторую текстуру без выделяющихся оригинальных ключевых точек.

В рамках прямых методов одометрии [16–18] параметры сдвига и поворота определяются путем анализа плотного поля соответствий между кадрами изображений. В рамках этого подхода наиболее популярным является метод экстремальной корреляции. Исследования [12] также подтвердили эффективность этого метода в задаче оценивания траектории аппарата, у которого ориентация камеры относительно глобальной системы координат не изменяется в течение всего времени движения.

В случае жесткого закрепления камеры на аппарате реализация этого метода существенно усложняется. В данном случае для каждой пары кадров нормированный коэффициент корреляции необходимо рассчитывать как для всех возможных сдвигов, так и для различных относительных углов поворота. При этом, если для повышения точности уменьшать шаг дискретизации, существенно возрастает вычислительная сложность, что ставит под сомнение возможность реализации такой системы оценки текущей траектории в реальном времени.

В настоящей работе предлагается технология визуальной одометрии, принципиальное отличие которой от системы, описанной в работе [12], состоит в реализации метода корреляции на этапе определения межкадровых сдвигов и поворотов. Идея состоит в том, что для определения сдвига и поворота используются два фрагмента изображения, находящиеся на значительном удалении от центра изображения. Размеры фрагментов и их расстояния от центра выбираются так, чтобы при максимально возможном относительном повороте разность координат соответствующих точек не превышала половины межпиксельного расстояния. Вид сверху на аппарат при его движении по



Рис. 1. Схема движения аппарата (a) и схема расположения фрагментов на кадре (b).

траектории и схема расположения фрагментов на одном кадре изображения показаны на рис. 1,a и 1,b соответственно.

В рамках описанной схемы съемки реализация основных этапов технологии, применявшихся в работе [12], существенно изменена. Теперь первый этап — экстремальной корреляции и второй этап — уточнение сдвигов методом оптического потока выполняются для каждого из указанных фрагментов отдельно. Появляются также новые этапы — оценка межкадрового и текущего накопленного углов поворота аппарата, а также формирование оценок траектории с использованием текущих оценок накопленного угла поворота. Кроме того, на завершающем этапе технологии коррекция оценок траектории осуществляется только по одной координате (OX) в направлении текущего вектора скорости аппарата (см. рис. 1,*a*). Подчеркнем, что указанные новые решения связаны с тем, что последовательность изображений формируется камерой, жестко связанной с корпусом аппарата.

Цель настоящего исследования состоит в разработке методов и алгоритмов, реализующих перечисленные этапы технологии, а также в экспериментальной проверке достижимой точности сквозной технологии в целом, включающей все указанные этапы.

### 2. Описание технологии

#### 2.1. Основные предположения и обозначения

Рассматривается задача автономной навигации аппарата, движущегося по земной (далее опорной) поверхности, с использованием последовательности изображений этой поверхности. Изображения формируются камерой, направленной перпендикулярно вниз. Задача состоит в том, чтобы в каждой точке траектории определить относительный сдвиг и поворот соседних кадров. Поскольку расстояние от камеры до поверхности невелико, при определении межкадровых сдвигов и поворотов можно пренебречь проективными искажениями.

Для каждого кадра последовательности будем задавать локальную систему координат. Для определенности примем, что прямоугольная система ко-



Рис. 2. Локальная система координат.

ординат связана с первым (по времени регистрации) изображением. Точка O (начало системы координат) находится в центре кадра, а положительное направление оси Ox совпадает с направлением движения аппарата (см. рис. 1). На рис. 2 показана схема взаимного расположения двух кадров изображений, обозначенных 1 и 2 (в кружках) в локальной системе координат, связанной с первым изображением. Первая цифра в обозначениях точек означает номер кадра, а вторая — номер фрагмента в соответствии с нумерацией, показанной на рис. 1. Например, 1.1 означает фрагмент 1 на первом кадре, 2.1 — фрагмент 1 на втором кадре и т.д. Центральные точки кадров изображений 1 и 2 обозначены «1.m» и «2.m» соответственно.

### 2.2. Алгоритм экстремальной корреляции

Используется двухпозиционный алгоритм корреляции по двум фрагментам с центрами в точках 1.1 и 1.2 на первом изображении и в точках 2.1 и 2.2 на втором изображении (см. рис. 2). Сдвиги определяются для пары фрагментов 1.1–2.1 и для пары 1.2–2.2.

Для того, чтобы обеспечить возможность применения стандартной процедуры корреляции на фрагментах, формулируется следующее требование. Координаты соответствующих точек фрагментов, используемых для вычисления нормированного коэффициента корреляции, должны различаться менее чем на половину межпиксельного расстояния при предельно возможных относительных межкадровых поворотах. Ясно, что это требование будет выполняться для всех точек фрагмента, если оно выполняется для точки наиболее удаленной от центра фрагмента. Если фрагмент квадратный с размерами  $N \times N$ , достаточно сформулировать это условие для одной угловой точки внешнего контура фрагмента.

На рис. З приведена схема взаимного положения угловых точек одноименных фрагментов на соседних изображениях. Эта схема иллюстрирует связь размеров фрагмента с максимально допустимым относительным углом поворота изображений. Здесь  $\alpha$  — угол межкадрового поворота, l — дуга, соеди-



Рис. 3. К обоснованию размеров фрагментов.

няющая наиболее удаленные (угловые) точки (1 и 2) фрагментов соседних изображений; R — расстояния от центральной точки совмещенных фрагментов до точек 1 и 2.

Длина дуги l не может быть меньше расстояния между точками 1 и 2. Тогда полагая, что tg  $\alpha \cong \alpha$ , для квадратной  $N \times N$ -области можно записать условие, при котором это расстояние будет меньше половины межпиксельного расстояния:

(1) 
$$N \le \frac{\Delta_{pix}}{2\sqrt{2} \cdot \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол относительного поворота (в радианах),  $\Delta_{pix}$  — масштабный коэффициент, зависящий от выбранной единицы измерения сдвига ( $\Delta_{pix} = 1$ , если сдвиг измеряется целым числом пикселей).

В таблице приведены предельные значения относительных поворотов для некоторых широко используемых размеров областей, используемых при вычислении нормированного коэффициента корреляции. Заметим, что указанные значения предельных углов обычно не создают проблем. Даже при сравнительно малой скорости регистрации 30 кадров в секунду и ограничении 3° угловая скорость аппарата на поворотах может достигать скорости 90 град/с, т.е. четверть полного оборота за одну секунду. При этом область корреляции 11 × 11 содержит 121 точку, что вполне достаточно для получения надежного результата.

Таким образом, первый этап технологии сводится к следующей последовательности шагов. На соседних кадрах изображений задаются два фрагмента (на рис. 2 центры этих фрагментов на первом кадре обозначены 1.1 и 1.2), разнесенные по возможности на достаточно большое расстояние L, при котором фрагменты «видны» на обоих изображениях. Размеры фрагментов задаются в соответствии с условием (1), при выполнении которого сдвиг одноименных пикселей, соответствующих фрагментов на двух видах (здесь 1 и 2) не превы-

преденьные унны относительным поверетов		
Размеры фрагмента	Предельный угол (рад.)	Предельный угол (град.)
$5 \times 5$	0,1750	10,0250
$7 \times 7$	0,1173	6,7213
$9 \times 9$	0,0882	5,0511
11×11	0,0589	3,3723

Предельные углы относительных поворотов

шает половины межпиксельного расстояния при максимальном возможном межкадровом повороте.

Далее задавая центры областей поиска в точках 2.1 и 2.2 второго кадра, с использованием процедуры экстремальной корреляции, определяем целопиксельные координаты сдвига точки 2.1 по отношению к точке 1.1

(2) 
$$m_1, n_1$$

и точки 2.2 по отношению к точке 1.2

(3) 
$$m_2, n_2.$$

Полученные методом корреляции сдвиги выражаются целыми числами пикселей. В задачах визуальной одометрии даже малые ошибки в пределах долей пикселя вследствие накопления на длинных участках траектории могут приводить к значительным ошибкам в конечной точке. Поэтому важным этапом технологии является субпиксельное уточнение полученных оценок.

### 2.3. Уточнение оценок сдвига методом оптического потока

Для уточнения оценок в пределах одного пикселя так же, как в [12], применяется метод оптического потока. Важным отличием в данном случае является то, что уравнения оптического потока должны применяться отдельно для каждого фрагмента. Таким образом, формируются две независимые системы

(4) 
$$\mathbf{I}_{x,y}^1 \Delta_1 = \mathbf{I}_t^1,$$

(5) 
$$\mathbf{I}_{x,y}^2 \Delta_2 = \mathbf{I}_t^2$$

где  $\mathbf{I}_{x,y}^1 = [\mathbf{I}_x^1, \mathbf{I}_y^1], \ \mathbf{I}_{x,y}^2 = [\mathbf{I}_x^2, \mathbf{I}_y^2] - N \times 2$ -матрицы для фрагментов 1 и 2 соответственно, а фигурирующие здесь  $N \times 1$ -матрицы  $\mathbf{I}_x^1, \ \mathbf{I}_y^1, \ \mathbf{I}_x^2, \ \mathbf{I}_y^2, \ \mathbf{I}_t^1, \ \mathbf{I}_t^2 -$ определяются как

(6) 
$$\mathbf{I}_{x}^{1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{1}^{1}}{\partial x}, \frac{\partial I_{2}^{1}}{\partial x}, \dots, \frac{\partial I_{N}^{1}}{\partial x} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{I}_{y}^{1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{1}^{1}}{\partial y}, \frac{\partial I_{2}^{1}}{\partial y}, \dots, \frac{\partial I_{N}^{1}}{\partial y} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \\ \mathbf{I}_{t}^{1} = \begin{bmatrix} -\partial I_{1}^{1}, -\partial I_{2}^{1}, \dots, -\partial I_{N}^{1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

(7) 
$$\mathbf{I}_{x}^{2} = \left[\frac{\partial I_{1}^{2}}{\partial x}, \frac{\partial I_{2}^{2}}{\partial x}, \dots, \frac{\partial I_{N}^{2}}{\partial x}\right]^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{I}_{y}^{2} = \left[\frac{\partial I_{1}^{2}}{\partial y}, \frac{\partial I_{2}^{2}}{\partial y}, \dots, \frac{\partial I_{N}^{2}}{\partial y}\right]^{\mathrm{T}}, \\ \mathbf{I}_{t}^{2} = \left[-\partial I_{1}^{2}, -\partial I_{2}^{2}, \dots, -\partial I_{N}^{2}\right]^{\mathrm{T}}.$$

Размеры фрагментов, из отсчетов которых формируются уравнения (4), (5), задаются так, что эти системы являются переопределенными, поэтому вычисляются параметры сдвига, оптимальные в среднеквадратическом смысле:

(8) 
$$\Delta_1 = \left[\Delta_{x,1}, \Delta_{y,1}\right]^{\mathrm{T}} = \left[I_{x,y}^{1} \ {}^{\mathrm{T}}\mathbf{I}_{x,y}^{1}\right]^{-1} \mathbf{I}_{x,y}^{1} \ {}^{\mathrm{T}}\mathbf{I}_{t}^{1},$$

(9) 
$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} \Delta_{x,2}, \Delta_{y,2} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{x,y}^2 \ ^{\mathrm{T}}\mathbf{I}_{x,y}^2 \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{I}_{x,y}^2 \ ^{\mathrm{T}}\mathbf{I}_t^2.$$

Полученные субпиксельные смещения добавляются к найденным ранее корреляционным методом целопиксельным относительным смещениям (2) и (3):

(10) 
$$m_{x,1} = m_1 + \Delta_{x,1}, \quad n_{y,1} = n_1 + \Delta_{y,1},$$

(11) 
$$m_{x,2} = m_2 + \Delta_{x,2}, \quad n_{y,2} = n_2 + \Delta_{y,2}.$$

Следует напомнить, что уравнения оптического потока формируются по данным, которые являются линейными членами разложения функции яркости в малой окрестности. Поэтому точность оценок существенным образом зависит от интервала аппроксимации. С учетом этого для повышения точности оценок предварительно совмещаются соответствующие пары фрагментов с использованием результатов определения целопиксельных сдвигов, полученных методом корреляции. При этом оценки (8), (9) не могут превышать одного межпиксельного расстояния. Указанное свойство может использоваться в качестве одного из признаков плохой обусловленности или даже вырожденности задачи. Здесь не затрагиваются эти проблемы, являющиеся предметом специальных исследований.

### 2.4. Формирование текущих оценок координат траектории

В предположении, что камера жестко закреплена на корпусе аппарата, далее вычисляем координаты центральных точек  $m_{x,0}$  и  $n_{y,0}$  обоих изображений:

(12) 
$$m_{x,0} = (m_{x,1} + m_{x,2})/2,$$

(13) 
$$n_{y,0} = (n_{y,1} + n_{y,2})/2$$

и определяем общий межкадровый сдвиг S центральных точек кадров 1 и 2 как евклидову норму сдвигов в направлении осей Ox, Oy локальной системы координат:

(14) 
$$S = W^* \sqrt{m_{x,0}^2 + n_{y,0}^2}$$

где W — коэффициент («цена» пикселя), определяемый на этапе калибровки в метрических единицах.

Угол  $\Delta \alpha$  межкадрового поворота в локальной системе координат, в соответствии с принятыми обозначениями, определяется как

(15) 
$$\Delta \alpha = \arcsin\left(n_{y,1} - n_{y,2}\right)/L,$$

а текущее направление движения аппарата для любой точки траектории в глобальной системе координат (далее угол  $\alpha$ ) является суммой углов  $\Delta \alpha_i$ ,  $i = 1, 2, \ldots$  локальных межкадровых поворотов всех предшествующих данной точке пар кадров.

Для вычисленного в каждой точке траектории угла  $\alpha$ , характеризующего текущее направление движения аппарата, определяются приращения координат в глобальной системе координат:

(16) 
$$\Delta x = S^* \cos \alpha,$$

(17) 
$$\Delta y = S^* \sin \alpha.$$

Текущие координаты траектории в любой точке, как и текущий угол, являются суммой приращений, вычисленных в соответствии с (15), (16) на всех предшествующих точках. Знаки приращений определяются текущими значениями накопленного угла  $\alpha$ . Ясно, что координаты  $x_0$ ,  $y_0$  и угол  $\alpha_0$  в начальной точке глобальной системы координат, с которых «стартует» алгоритм формирования текущих оценок параметров движения, должны быть заданы точно.

## 2.5. Алгоритмы коррекции текущих оценок и общая схема технологии

Точность оценивания траектории в значительной степени зависит от качества калибровки. Если задана эталонная траектория, калибровка может быть выполнена точно. Однако это не гарантирует высокого качества оценивания траектории, так как параметры движения и установки камеры могут отличаться от эталонных. Если эталонной траектории нет, «цена пикселя» определяется путем расчета по заданным параметров движения и конструкции аппарата. Ясно, что в этом случае, тем более, возможны отличия от заданных значений. Средние калибровочные характеристики можно корректировать по результатам предыдущих проездов. Однако кратковременные отклонения вследствие неравномерности движения носят случайный характер и могут корректироваться только в процессе движения.

Здесь используется алгоритм эпизодической коррекции траектории по наблюдениям текущих отклонений калибровочных характеристик от средних значений на коротких отрезках траектории. В отличие от [12] в данном случае коррекции подвергается только составляющая перемещения в направлении движения аппарата (в направлении оси *Ox* локальной системы координат). Алгоритм корректировки оценок траектории состоит из следующих шагов.

С использованием найденных по формуле (14) межкадровых сдвигов центральных точек  $S_k$ , k = 1, K (здесь K — число точек на отрезке коррекции)



Рис. 4. Связь основных блоков системы визуальной одометрии, осуществляющих вычисление: межкадровых сдвигов методом корреляции (1), субпиксельных оценок методом оптического потока (2), координат центральных точек кадров изображений (3), локального угла межкадрового поворота  $\Delta \alpha$  (4), локального межкадрового сдвига центров кадров (5), угла  $\alpha$  текущего направления в глобальной системе координат (6), локальных приращений координат (7), текущих оценок координат траектории (8), суммарного приращения координат на малом отрезке (9), корректирующих добавок координат (10).

определяем общий сдвиг  $S_{\Sigma}$  на заданном локальном отрезке траектории:

(18) 
$$S_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{K} S_k.$$

Далее определяем отношение отклонения общего сдвига от эталонного значения (вычисленного на этапе калибровки) к общему сдвигу на локальном участке:

(19) 
$$\Delta S_{relate} = \left(S_{\Sigma} - S_{etal}\right) / S_{\Sigma}.$$

Решающее правило корректировки состоит в проверке условий:

(20) 
$$\Delta S_{relate} < thr_{\Delta S_{relat}} \quad \mathbf{M} \quad |\Delta S_{\Sigma} >| thr_{\Delta S_{\Sigma}},$$

где  $thr_{\Delta S_{\text{relat}}}, thr_{\Delta S_{\Sigma}}$  — заданные пороговые значения. Если оба неравенства выполняются, вычисляется корректирующая добавка

(21) 
$$\Delta x_{kor} = par \Delta S_{relate} sign(\Delta S_{\Sigma}),$$

которая на следующем такте оценки траектории суммируется с текущей оценкой.

Общая структурная схема описанной системы визуальной одометрии представлена на рис. 4. Здесь в блоках 1–8 реализуется технология оценки текущих координат траектории, включающая следующие этапы: определение целопиксельных сдвигов методом экстремальной корреляции, субпиксельное уточнение оценок методом оптического потока по соотношениям (4)–(11) и формирование текущих оценок координат траектории по соотношениям (12)–(17). Блоки 9, 10 реализуют алгоритм коррекции текущих оценок в соответствии с соотношениями (18)–(21).

### 3. Экспериментальные исследования

### 3.1. Моделирование тестовых траекторий

К сожалению, в настоящее время в открытом доступе пока отсутствуют тестовые последовательности изображений опорной поверхности, соответствующие изучаемой схеме съемки. Поэтому первая часть экспериментов состояла в моделировании эталонных траекторий для различных типов опорных поверхностей. Моделирование проводилось на плоских горизонтальных поверхностях. Это не является серьезным недостатком, так как траекторию движения по заданному рельефу всегда можно восстановить по локальным проекциям отрезков траектории на плоскость, касательную к каждой точке рельефа.

Технология моделирования последовательностей изображений опорных поверхностей строилась следующим образом. На основе игрового движка Unreal Engine 4 [19] проектировалась виртуальная сцена с имитацией различного типа подстилающей поверхности, в нулевых координатах которой располагалась модель робота с установленной камерой регистрации. В момент старта симуляции робот проходил заданные траектории (прямая, окружность, квадрат, восьмерка, не пересекающаяся и пересекающаяся поверхность) с заданной скоростью перемещения (2, 8 и 15 км/ч), повторяя итерацию для каждого типа подстилающей поверхности. Камера, закрепленная на роботе и направленная вниз, записывала изображения с частотой 60 кадров в секунду. Последовательности изображений опорных поверхностей сформированы для следующих типов поверхности: древесное, каменистое (гравий), почвенное, бетонное и металлическое покрытия, а также песок, грязь и уличная плитка. Последовательности изображений различной длины для указанных типов опорных поверхностей размещены на сайте [20].

### 3.2. Эксперимент по оценке точности технологии

Для проверки качества разработанной технологии визуальной одометрии использовалась тестовая траектория, включающая 2111 изображений опорной поверхности типа гравий на отрезке времени 35,18 с и соответствующий этой последовательности файл точных координат траектории.

На рис. 5 приведены тестовая (отмечена символом \*) и оцененная (символ о) траектории, полученные при следующих значениях параметров алгоритмов: размеры фрагментов —  $9 \times 9$ ; расстояние от центра кадра до фрагмента — L/2 = 100 (пикселей), соответственно расстояние между фрагментами L = 200 (пикселей); среднее значение калибровочного коэффициента W = 0,0782, длина участка для вычисления локальных калибровочных коэффициентов — 25 точек.

Тестовая траектория строилась по значениям, взятым из файла точных координат. За время между соседними точками на траекториях обрабатывалось 25 кадров последовательности изображений. Координаты начальных точек тестовой и оцененной траектории совпадали (точка — 0).

На рис. 6 приведены графики ошибок оценивания угла (в рад.) и текущих координат траектории (в см), полученные при указанных выше условиях



Рис. 5. Тестовая (\*) и оцененная (о) траектории (общая точка старта - 0).



Рис. 6. Графики изменения во времени текущего угла  $\alpha$  (×) (рад.) и евклидовой ошибки оценивания траектории (см): без коррекции (+), с коррекцией оценок (\*).

эксперимента и значениях параметров алгоритмов. При этом были получены следующие относительные значения СКО:

- по координате X 0,0647,
- по координате Y 0,0491,
- по евклидовой метрике 0,0569.

На графиках видно, что при отсутствии коррекции оценок (+) ошибка одометрии возрастает при быстром изменении (возрастании) текущего угла ( $\times$ ). Ошибка существенно снижается в результате коррекции оценок траектории (\*). Относительные ошибки в конечной точке траектории составили менее 0,02 и 0,04 для координат X и Y соответственно.

## 4. Заключение

Предложена новая технология прямой визуальной одометрии по последовательности изображений опорной поверхности, регистрируемых камерой, жестко закрепленной на корпусе аппарата. Технология включает следующие основные этапы: определение межкадровых (целопиксельных) сдвигов методом экстремальной корреляции (1); субпиксельное уточнение оценок сдвига методом оптического потока (2); определение локальных межкадровых и накопленного углов поворота аппарата (3); формирование текущих оценок координат траектории с использованием локальных межкадровых сдвигов и текущего угла поворота (4); коррекция текущих оценок координат путем вычисления локальных тарировочных характеристик в процессе движения.

Важной особенностью разработанной технологии является определение межкадровых сдвигов, как целопиксельных, так и субпиксельных отдельно на двух разнесенных фрагментах каждого кадра. Для реализации этого подхода наложены ограничения на размеры этих фрагментов, при которых сдвиг соответствующих точек фрагментов не превышает половины межпиксельного расстояния. Выполнение указанного требования позволило независимо определить локальные межкадровые повороты, используя уже найденные координаты центров фрагментов. Это обеспечило повышение точности оценок траектории и существенное сокращение объема вычислений, так как отпала необходимость на каждом такте вычислять матрицу поворота.

В рамках предложенной технологии реализован алгоритм коррекции текущих оценок траектории путем вычисления отклонений локальных тарировочных характеристик от их заданных средних значений. В данном случае для жестко закрепленной камеры особенность состоит в том, что коррекция осуществляется только в направлении оси *OX* локальной системы координат. Приведенные результаты показывают возможность оценивания траектории в реальном времени с высокой точностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Delmerico J., Scaramuzza D. A benchmark comparison of monocular visualinertial odometry algorithms for flying robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, Australia, 2018. P. 2502–2509. https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460664
- He M., Zhu C., Huang Q., Ren B., Liu J. A review of monocular visual odometry // Visual Comput. 2020. V. 36. P. 1053–1065. https://doi.org/10.1007/s00371-019-01714-6
- 3. Gao L., Su J., Cui J., Zeng X., Peng X., Kneip L. Efficient Globally-Optimal Correspondence-Less Visual Odometry for Planar Ground Vehicles // IEEE In-

ternational Conference on Robotics and Automation (ICRA), Paris, France, 2020. P. 2696–2702 (2020). https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196595

 Forster C., Zhang Z., Gassner M., Werlberger M., Scaramuzza D. SVO: Semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems // IEEE Transac. on Robot. 2017. V. 33. No. 2. P. 249–265.

https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2623335

Muller P., Savakis A. Flowdometry: An optical flow and deep learning based approach to visual odometry // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Santa Rosa, USA, 2017. P. 624–631.

https://doi.org/10.1109/WACV.2017.75

- 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. https://doi.org/10.3390/robotics5040025
- Birem M., Kleihorst R., El-Ghouti N. Visual odometry based on the Fourier transform using a monocular ground-facing camera // J. Real-Time Image Proc. 2018. V. 14. P. 637–646. https://doi.org/10.1007/s11554-017-0706-3
- Gilles M., Ibrahimpasic S. Unsupervised deep learning based ego motion estimation with a downward facing camera // Vis Comput, 2021. https://doi.org/10.1007/s00371-021-02345-6
- Fu B., Shankar K.S., Michael N. RaD-VIO: Rangefinder-aided Downward Visual-Inertial Odometry // International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, 2019, P. 1841–1847.
  https://doi.org/10.1100/ICDA.2010.8702741

https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793741

- Goecke R., Asthana A., Pettersson N., Petersson L. Visual Vehicle Egomotion Estimation using the Fourier-Mellin Transform // IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, 2007. P. 450–455. https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290156
- Nourani-Vatani N., Borges P.V.K. Correlation-based visual odometry for ground vehicles // J. Field Robot. 2011. V. 28. No. 5. P. 742–768. https://doi.org/10.1002/rob.20407
- Фурсов В.А., Минаев Е.Ю., Котов А.П. Оценивание параметров движения аппарата по наблюдениям опорной поверхности // АиТ. 2021. № 10. С. 124–139. Fursov V.A., Minaev E.Y., Kotov A.P. Vehicle Motion Estimation Using Visual Observations of the Elevation Surface // Autom. Remote Control. 2021. V. 82. No. 10. P. 1730–1741.
- Kitt B., Geiger A., Lategahn H. Visual odometry based on stereo image sequences with ransacbased outlier rejection scheme // IEEE intelligent vehicles symposium, La Jolla, USA, 2010. P. 486–492. https://doi.org/10.1109/IVS.2010.5548123
- Pire T., Fischer T., Civera J., Cristoforis P.D., Berlles J.J. Stereo parallel tracking and mapping for robot localization // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015. P. 1373–1378. https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353546
- Mur-Artal R., Tardos J.D. Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras // IEEE Transac. Robot. 2017. V. 33. No. 5. P. 1255–1262. https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2705103
- Newcombe R.A., Lovegrove S.J., Davison A.J. Dtam: Dense tracking and mapping in real-time // International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 2011. P. 2320–2327. https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126513

- 17. Engel J., Schops T., Cremers D. Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam // European conference on computer vision, Zurich, Switzerland, 2014. P. 834–849. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2\_54
- Kerl C., Sturm J., Cremers D. Dense visual slam for rgb-d cameras // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 2013. P. 2100–2106. https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696650
- 19. https://www.unrealengine.com // Unreal engine 4 Game Engine. 2021.
- 20. https://github.com/by-LZ-for/Synthetic-Dataset-Robot // Synthetic Dataset for Visual Odometry. 2021.

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

Поступила в редакцию 23.01.2022 После доработки 14.04.2022 Принята к публикации 29.06.2022