

Комплексирование визуальной информации в задаче локализации мобильной платформы

С.А.К. Диане,
к.т.н., с.н.с., diane1990@yandex.ru,
И.В. Зинченко,
техн., ziv97@mail.ru,
ИПУ РАН, г. Москва

Перспективным подходом к определению положения мобильного робота является оценка его траектории на основе анализа последовательности видеок кадров, получаемых с бортовой видеокамеры. Данная задача может быть решена при помощи алгоритма Лукаса-Канаде, который позволяет оценить смещения участков изображения в локальной системе координат камеры. Для повышения точности бортовой визуальной одометрии можно использовать систему внешней навигации, также основанную на применении видеокамеры, расположенной под некоторым углом к поверхности перемещения. Локализация робота при этом основывается на обнаружении закрепленной на нем графической метки. Поскольку обе системы технического зрения решают близкие задачи, они могут быть построены на базе унифицированной аппаратной платформы, включающей вычислитель, видеокамеру и средства беспроводной передачи данных.

A promising approach to determining the position of a mobile robot is through estimation of its trajectory based on the analysis of video frames sequence received from an onboard video camera. This problem can be solved with the help of Lucas-Kanade algorithm, which allows estimating the displacement of image areas in the local coordinate system of the camera. To improve the accuracy of the onboard visual odometry, an external navigation system may be used, also based on the use of a video camera located at some angle to the surface of the movement. Localization of the robot is based on the detection of a graphic label attached to it. Since both vision systems solve similar problems, they can be built on the basis of a unified hardware platform that includes a computer, a video camera and wireless data transmission facilities.

Введение

Одной из ключевых задач обработки информации в системах управления автономными роботами является определение пространственного положения мобильной платформы. Известны методы решения данной задачи на основе применения инерциальных и колесных одометрических датчиков, однако они обладают невысокой точностью в ряде прикладных задач, связанных с передвижением робота по сложным поверхностям в условиях неполноты информации о их механических характеристиках и рельефе.

Перспективным подходом к определению положения робота является оценка траектории передвижения робота на основе анализа последовательности видеок кадров, получаемых с бортовой видеокамеры. Данная задача может быть решена при помощи алгоритма Лукаса-Канаде [1], который основывается на оценке оптического потока и позволяет оценить смещения небольших областей изображения в локальной системе координат камеры.

Оптический поток – описание видимого движения, представляющее собой однозначно идентифицируемых точек между двумя изображениями (как правило последовательными видеок кадрами). Оценка перемещения объекта выполняется по результатам сравнения положений схожих объектов на двух последовательных кадрах. Понятие оптического потока лежит в основе целого ряда алгоритмов, связанных с регистрацией движения, сегментацией объектов, кодированием движений, подсчетом диспаратета стереокамер и т.д.

Анализ методов вычисления оптического потока проведен в работе [2]. В ней эти методы рассмотрены как с точки зрения точности, так и с точки зрения плотности получаемого векторного поля. Алгоритмы, построенные на оптическом потоке, вычисляют движение между двумя кадрами, взятыми в момент времени t и $t + \Delta t$, в каждом пикселе. Подобные методы называются дифференциальными, так как они основаны на приближении сигнала отрезком ряда Тейлора и используют частные производные по времени и пространственным координатам.

Вместе с тем, необходимо отметить, что локализация мобильного робота с применением визуальной одометрии характеризуется возрастающей с течением времени погрешностью. В качестве решения данной проблемы можно использовать систему внешней навигации, также основанную на анализе изображения с видеокамеры, расположенной под некоторым углом к поверхности перемещения. Если бортовая система технического зрения (БСТЗ) робота фиксирует скорость его передвижения, то внешняя система технического зрения (ВСТЗ) позволяет получить независимую оценку положения робота в глобальной системе координат.

1. Локальная навигация

Один из самых широко используемых алгоритмов в компьютерном зрении для реализации оптического потока, является дифференциальный локальный метод Лукаса-Канаде. Данный метод называют дифференциальным, поскольку в его основе лежит вычисление частных производных. Для данного подхода справедливо предположение, что значения пикселей переходят из одного кадра в следующий без изменений. Под значением пикселя понимается информация о его цвете. Данное допущение можно записать в виде $I(x, y, t) = I(x + u_x, y + u_y, t + 1)$, где I – это функция яркости пикселей, зависящая от времени и координаты, u_x, u_y – смещения, t – номер кадра.

Для реализации данного метода была применена процедура, входящая в состав библиотеки OpenCV. Входными аргументами функции являются:

- предыдущее и текущее изображения;

- пиксели, по которым производится оценка перемещения;
- дополнительные параметры, связанные с настройкой производительности.

На примере видео, полученного с биноклярной камеры, установленной на мобильного робота, были исследованы возможности метода Лукаса-Канаде в задаче предварительной оценки движения робота относительно ровной горизонтальной поверхности (рис.1). В данном случае рассмотрены перемещения отдельных пикселей в нижней части изображения. Можно заметить, что на данном кадре получена информация о том, что мобильный робот осуществляет поворот влево.

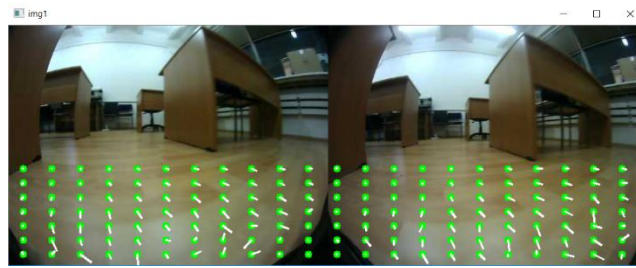


рис. 1 Массив опорных точек для оценки оптического потока

Расположение опорных точек выбрано исходя из нескольких соображений. Во-первых, для того, чтобы исключить влияние объектов априорно неизвестной формы, встречающихся на пути движения робота, на оценку его скорости относительно пола комнаты, массив опорных точек располагается в области изображения, соответствующей ближней зоне наблюдения бортовой камеры. Помимо прочего, такое расположение позволяет исключить из рассмотрения дальние участки видимой зоны, где погрешность оценки относительного смещения пикселей возрастает в силу ограниченной разрешающей способности камеры. Во-вторых, требуется соблюсти компромисс между скоростью расчета оптического потока в заданных опорных точках и точностью определения обобщенного вектора S , характеризующего смещение поверхности в поле зрения камеры. Вектор $S = \{S_x, S_y\}$ определяется в результате усреднения векторов в отдельных точках изображения:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i,$$

где N – число опорных точек, $s_i = \{\Delta x, \Delta y\}$ – оценка горизонтального и вертикального смещения участка изображения в заданной точке.

Отметим, что компонента S_x обобщенного вектора линейно пропорциональна боковому смещению робота или же его повороту в горизонтальной плоскости. Последнее является наиболее вероятным событием при движении робота с передними поворотными колесами на малых скоростях. Компонента S_y обобщенного вектора линейно пропорциональна поступательной скорости робота. Другими словами, линейная и угловая скорости робота (рис. 2) могут быть определены как $Q = \{V, \omega\}$, где $V = k_v \cdot S_y$; $\omega = k_\omega \cdot S_x$.

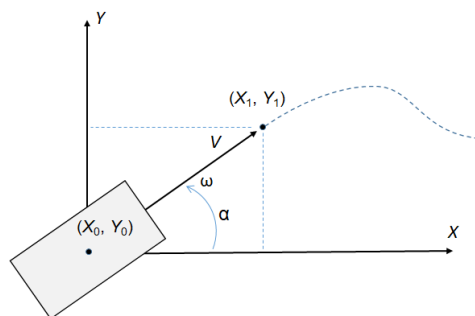


рис. 2 Кинематические параметры робота

Таким образом, в глобальной системе координат поиск точек смещения при задании начальных параметров $P_0 = \{X_0, Y_0, \alpha_0\}$ будет осуществляться по следующей формуле:

$$P_{t+1} = P_t \times Q_t = P_t + \begin{pmatrix} V \cdot \cos(\alpha_t) \\ V \cdot \sin(\alpha_t) \\ \omega \end{pmatrix} \cdot \Delta t \quad (1)$$

где n – номер видеокadra, Δt – интервал времени между кадрами.

2. Внешняя навигация

Для поиска начальных параметров X_0, Y_0, α_0 и последующего уточнения координат робота, получаемых при помощи визуальной одометрии, целесообразно использовать внешнюю камеру видеонаблюдения. Так, получение изображения с использованной в проекте USB-камеры основывается на встроенной функциональности библиотеки

OpenCV. Видеокамера установлена под наклоном, что препятствует возможности напрямую измерять навигационные параметры робота (рис. 3).

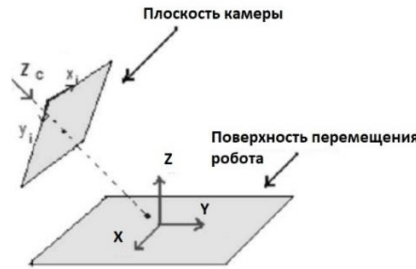


рис. 3 Схема расположения камеры

Для получения вертикальной проекции поверхности требуется выполнить перспективное преобразование плоскости с использованием матрицы проективного преобразования (гомографии).

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = H_o \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

Матрица гомографии определяется пространственным расположением камеры и имеет следующий вид [3, 4]:

$$H_o = \begin{pmatrix} f & x_0 \cdot \cos(\alpha) & y_0 \cdot h \cdot \cos(\alpha) \\ 0 & f \cdot \sin(\alpha) - y_0 \cdot \cos(\alpha) & y_0 \cdot h \cdot \cos(\alpha) - f \cdot h \cdot \sin(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & h \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix},$$

где f –фокусное расстояние, α – угол наклона, h – высота камеры, x_0, y_0 –координаты принципиальной точки в системе координат камеры.

Как отмечалось ранее, плоскость камеры находится под углом к поверхности перемещения.Для экспериментального определения матрицы гомографии на этой поверхности требуется расположить специальные метки. Тогда, оператор ВСТЗ на этапе ее настройки в интерактивном режиме отмечает пиксели изображения, соответствующие меткам на полу комнаты. В дальнейшем это позволяет устранить перспективное искажение видеок кадров(рис. 4).

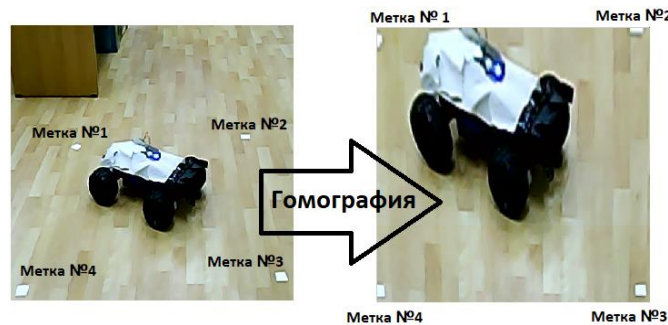


рис. 4 Перспективное преобразование изображения рабочей области

Следующий программной реализации системы локализациисвязан с осуществлением визуального поиска робота. Для этого на корпусе робота установлено два светодиода. Синий в задней части робота, а зеленый в передней. Так как по умолчанию все цвета в OpenCV представлены в формате BGR (B - синий, G - зеленый, R - красный), необходимо перевести полученное изображение в формат HSV (H - цветовой тон, S - насыщенность, V - яркость). Данный переход необходим для обеспечения инвариантности поиска цветных объектов в OpenCV от их яркости и насыщенности. Каждый цвет ищется в зависимости от диапазона, задаваемого на шкале цветового тона (рис. 5).



рис. 5 Поиск зелёной и синей метки на основе цветовой фильтрации изображения

Белое пятно отражает область, в которой на оригинальном изображении находится нужный цвет. Далее нам необходимо определить координаты каждого пятна:

$$(X_c, Y_c) = \frac{\sum_{x,y \in I} b_{(x,y)}(x,y)}{\sum_{x,y \in I} b_{(x,y)}}$$

где $b_{(x,y)}$ – яркость пятна, I – исходное изображение.

Очевидно, что при передвижении светодиодов, координаты искоемых пятен будут меняться. Для того чтобы определить ориентацию мобильной платформы необходимо через найденные для обоих цветов точки (X_c, Y_c) провести вектор, который будет указывать текущую ориентацию робота. В том случае когда размер рабочей области известен заранее, перевод координат графической метки X_c и Y_c в координаты реального мира X_r и Y_r осуществляется на основе линейной зависимости.

$$(X_r, Y_r) = \rho \cdot (X_c, Y_c).$$

Коэффициент пропорциональности вычисляется как $\rho = D_0 / L$, где D_0 – априорно известный линейный размер рабочей области, L – наблюдаемый размер рабочей области в пикселях.

3. Комплексирование навигационной информации

Обобщённые алгоритмы функционирования двух систем навигации представлены на рис. 6. Обе системы формируют с некоторой периодичностью оценки параметров движения робота в глобальной системе координат.

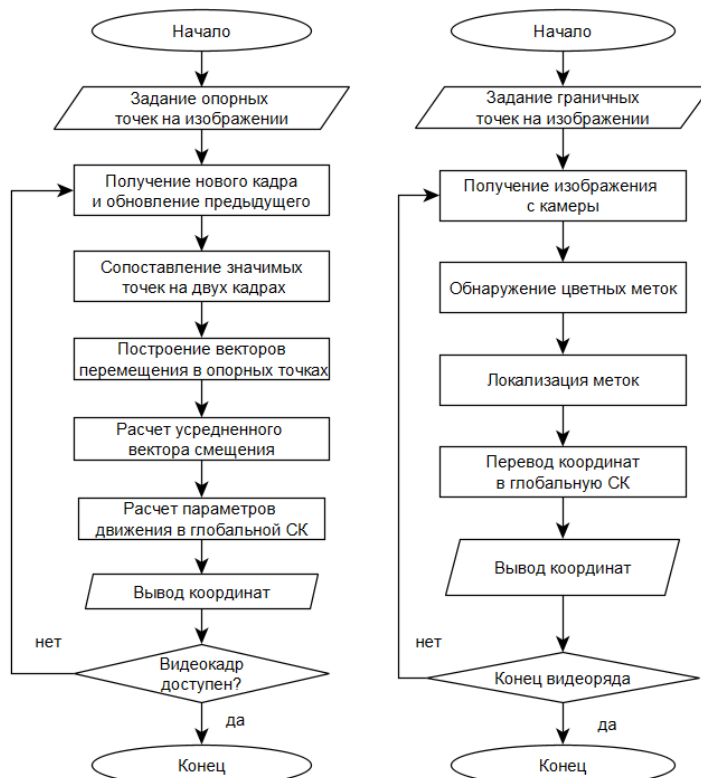


рис. 6 Алгоритмы функционирования БСТЗ (слева) и ВСТЗ (справа)

Пусть робот получает сообщения от ВСТЗ сообщения вида $P_t = \{X_t, Y_t, \alpha_t\}$ и от БСТЗ сообщения вида $Q_t = \{V_t, \omega_t\}$ с указанием координат и скоростей робота, а также момента времени, в который они были определены. Причем, частота сообщений от БСТЗ существенно выше чем от ВСТЗ, что может быть вызвано неполным покрытием зоны перемещения робота системой внешней навигации.

На любом шаге t в соответствии с формулой (1) можно рассчитать координаты робота от последнего момента времени t^* , в который было получено сообщение от ВСТЗ:

$$P'_t = P_{t^*} \times Q_{t^*} \times \dots \times Q_t.$$

Тогда проблема оценки траектории робота на интервале времени $[t^*, t]$ сводится к полиномиальной регрессии множества полученных и рассчитанных точек $\{P_{t^*}\} \cup \{P'_t(t^*)\}$. Данная задача эффективно решается методом наименьших квадратов[5].

Заключение

Таким образом, по результатам исследования были рассмотрены математические модели локализации робота на основе анализа как видеопотока с бортовой видеокамеры, так и с внешней системы наблюдения. Кроме того, была

разработана и на качественном уровне проверена их аппаратная реализация. Поскольку обе системы технического зрения решают близкие задачи, они построены на базе унифицированной платформы, включающей вычислитель, видеокамеру и средства беспроводной передачи данных.

Аналогия между двумя задачами визуальной навигации наблюдается и на уровне разработки программно-алгоритмического обеспечения. Одним из этапов обработки видеопотока является преобразование изображения из наклонной проекции в ортогональную. При известных характеристиках камеры подобное преобразование задается посредством матрицы гомографии.

Обеспечение точности и расширение зоны действия системы локализации потребовало выбора метода комплексирования двух источников навигационной информации. В качестве такой технологии был применен метод наименьших квадратов.

Основными перспективами исследования являются оценка количественных показателей комплексной системы навигации; дополнение ее третьим источником навигационной информации – бортовой инерциальной измерительной системой; сравнительный анализ методов регрессии для обобщения координат робота, получаемых от комплексированных систем локализации.

Литература

1. B. D. Lucas and T. Kanade (1981), An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, pages 121-130
2. J.L. Barron, D.J. Fleet and S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. *IJCV* 12:1, pp. 43-77, 1994
3. Laganier, R. Composing a bird's eye view mosaic. *Vision Interface*, 2000, pp. 382–386.
4. H. Hajjdiab et al. Multi-Robot SLAM: A Vision-Based Approach. *Multi-Robot Systems, Trends and Development*, Ed. by T. Yasuda and K. Ohkura. 2011
5. Ю. К. Кисин, О применении алгоритмов на основе метода наименьших квадратов и конечных формул в задачах обработки траекторных измерений. *Вестник Концерна ВКО "Алмаз - Антей"*. №3, 2016