

УДК 621.398

С.В. Кравцов**СГЛАЖИВАНИЕ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА НЕИЗВЕСТНОЙ СЦЕНЕ***

Эффективными сенсорными системами автономных мобильных роботов, направленными на изучение свойств окружающей среды, являются бортовые цифровые системы стереозрения. Эффективность бортовых цифровых систем стереозрения обусловлена высокой информативностью сигнала видеокамер, что делает возможным производить детальное изучение сцены в видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном диапазонах, осуществлять необходимые координатные измерения. Задачей исследований является анализ методов повышения точности координатных измерений бортовой системы цифрового стереозрения автономного мобильного робота, действующего на неизвестной сцене, за счет сглаживающей фильтрации. Анализируется коллинеарная цифровая система стереозрения из двух однотипных видеокамер с идентичными внутренними параметрами. Сглаживающая фильтрация координатных измерений осуществляется по классическому алгоритму фильтра Калмана. Рассмотрены проблема устойчивости и сходимости результатов фильтрации, а также методы их обеспечения. Для обеспечения устойчивости и сходимости результатов фильтрации измерений модель эволюции (экстраполяции) состояния системы должна обеспечивать несмещенность прогнозных расчетов. Несмещенность прогнозных расчетов достигается посредством стабилизации цифровой системы стереозрения на борту подвижной платформы и сопровождением достаточного количества особенностей сцены. Установлено, что применением процедур сглаживающей фильтрации можно существенно повысить точность координатных измерений бортовой системы цифрового стереозрения. Приводятся результаты модельных расчетов. Цифровые системы стереозрения являются самодостаточными измерительными системами, обеспечивающими высокую точность оптической одометрии посредством эффективной фильтрации координатных измерений без использования данных иных бортовых или внешних сенсоров. Результаты исследований могут использоваться для построения автономной системы локальной навигации и позиционирования мобильного робота на основе систем технического зрения.

Цифровая система стереозрения; фильтр Калмана; точность измерений; локальная навигация; автономный мобильный робот.

S.V. Kravtsov**SMOOTHING COORDINATE MEASUREMENTS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT ON BOARD DIGITAL STEREO VISION SYSTEM IN AN UNKNOWN SCENE**

Effective sensory systems of autonomous mobile robots, aimed at studying the properties of the environment are the onboard digital stereo vision system. The efficiency of onboard digital stereo vision systems due to the high information content of the signal of video cameras, which makes it possible to produce a detailed study of the scene in the visible, ultraviolet or infrared, to carry out the necessary measurements. The object of research is the analysis of methods for improving the accuracy of coordinate measurement systems onboard digital stereo vision of autonomous mobile robot acting on an unknown stage, due to the smoothing filter. Analyzed collinear digital stereo vision system of the two cameras of the same type with identical internal parameters. Smoothing filtering coordinate measurements carried out by the classical Kalman filter algorithm. The problems of stability and convergence filtration results, as well as methods for their support. To ensure stability and reproducibility of the measurement filter model of evolution (extrapolation) state of the system should provide unbiased forecast calculations. Unbiasedness forecast

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-00071-а.

calculations is achieved by stabilizing the digital stereo vision system on board the mobile platform and support a sufficient number of features of the scene. It was found that the application of the procedures of the smoothing filter can significantly improve the accuracy of coordinate measurement systems onboard digital stereo vision. The results of the model calculations. Digital systems are self-contained stereo vision measuring systems, providing precision optical odometry through effective filtration coordinate measurement data without the use of any other board or external sensors. The research results can be used to build an autonomous system of local navigation and positioning based on mobile robot vision systems.

Digital stereo vision system; Kalman filter; accuracy; local navigation; autonomous mobile robot.

Введение. На современном этапе уверенное функционирование мобильных роботов может быть обеспечено в относительно знакомых и хорошо структурированных рабочих пространствах. При работе в незнакомом или изменяющемся окружении мобильный робот должен иметь способность адаптироваться к изменениям в окружающей среде, реагировать на непредусмотренные ситуации и действовать на основании предыдущего опыта [2, 12, 13, 15]. Обычно, для решения задач навигации система управления роботом должна знать карту рабочего пространства и текущее местоположение самого робота на карте.

Задачи навигации мобильных роботов входят в число важнейших проблем управления, где робот имеет дело с изменяющейся внешней обстановкой. Робот должен воспринимать изменяющееся окружающее пространство и координировать свои действия в соответствии с этими изменениями. В связи с этим, обеспечение точности движения и позиционирования являются актуальными задачами управления мобильным роботом. Сложность этих задач связана с высоким уровнем неопределенности информации о характеристиках окружающей среды и мобильного робота, шумами и погрешностями в данных бортовых сенсорных систем.

Системы, направленные на решение задачи позиционирования мобильного робота, принято делить на два класса. Это системы глобального и локального позиционирования.

Системы глобального позиционирования позволяют найти координаты местоположения мобильного робота в принятой системе глобальных координат. Карта сцены считается известной, поэтому навигация осуществляется в соответствии с целью миссии по известной карте при постоянном уточнении информации о своей позиции на ней. Реализация систем глобального позиционирования требует развитой внешней технической инфраструктуры и организации интерфейса с ней. При этом затраты на бортовое оборудование могут быть минимальными.

К глобальным системам позиционирования следует отнести спутниковые навигационные системы – GPS, ГЛОНАСС, Galileo и другие; радионавигационные системы для наземной, морской и воздушной транспортной инфраструктуры; системы местоопределения на основе сетей сотовой связи и WiFi сетей и др.

Недостатком глобальных систем позиционирования является отсутствие взаимодействия с внешней средой. Это может привести к нежелательным ситуациям возникновения непредвиденных препятствий при перемещении по сцене вследствие неточности (устаревания) используемой карты или динамических изменений в окружающей обстановке.

Кроме того, системы глобального позиционирования имеют ряд ограничений, которые существенно влияют на их применение в специфических условиях. Например, для спутниковых систем навигации это практическая невозможность определять местонахождение внутри зданий, в подвалах или тоннелях. Уровень сигнала спутниковых систем серьезно ухудшается под покровом листвы деревьев и даже при большой облачности. На прием сигналов влияют помехи от наземных источников. Системы местоопределения на основе сетей сотовой связи и WiFi сетей имеют достаточно низкую точность.

Принцип действия систем глобального позиционирования заключается в использовании различных методов определения местоположения, среди которых известный метод триангуляции, сигнально-дальномерные методы, или даже банальные методы определения привязки к зоне ответственности, например, базовой станции сети сотовой связи или WiFi сети.

Системы локального позиционирования основаны на получении информации о внешней среде от бортовых сенсоров. Они не требуют взаимодействия с внешней технической инфраструктурой и для автономных роботов замыкаются на оборудование бортового вычислительного комплекса. Среди преимуществ таких систем следует отметить объективность получаемой информации о внешней среде. По данным от бортовых сенсоров строится формализованная карта, ограниченная радиусом действия сенсоров. Система координат данной карты привязана, как правило, к точке позиции мобильного робота. Карта при перемещении мобильного робота постоянно уточняется и дополняется. Локальная карта может быть совмещена с глобальной по выделенным и сопоставленным особенностям сцены, если предварительно известен район действий мобильного робота. В этом случае, с помощью системы локального позиционирования можно определять глобальное положение и эффективным способом планировать навигацию в соответствии с миссией автономного мобильного робота.

Наиболее тяжелой ситуацией является априорное незнание сцены действия мобильного робота. В этом случае задача построения карты сцены и позиционирование на ней являются двумя взаимосвязанными задачами, решаемыми одновременно в локальной системе координат. Точность построения карты и точность позиционирования на ней будут определяться точностными характеристиками бортовых сенсоров. Поскольку данные бортовых сенсорных систем зашумлены и имеют погрешности, в получаемой карте неизбежно будут присутствовать ошибки. Такого рода неопределенность известна как проблема SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*). Для минимизации погрешностей, как правило, используются данные разноплановых бортовых сенсоров в комплексе, а также процедуры постепенного уточнения карты за счет новых данных, получаемых при перемещении мобильного робота по сцене.

К числу бортовых сенсоров, используемых для локальной навигации и позиционирования, относят радарные и сонозные системы, системы лазерного сканирования и дальнометрии, принцип действия которых основан на эхо локации; датчики электромагнитного поля; контактные (тактильные) датчики и другие. Эффективными сенсорными системами представляются бортовые видеосистемы. Эффективность видеосистем обусловлена высокой информативностью сигнала видеосъемки, что делает возможным не только производить детальное изучение сцены в видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном диапазонах, но и осуществлять необходимые измерения.

Перспективным направлением считается применение в робототехнике систем стереозрения [12, 13, 15], состоящим из двух коллинеарных цифровых видеосистем. Коллинеарные системы стереозрения подобны системе зрения человека, приспособленной к объемному восприятию окружающего пространства. И хотя машинные методы анализа сцены во многом уступают возможностям человеческого восприятия, измерительные возможности систем стереозрения уже сегодня не только сопоставимы, но и значительно превосходят возможности зрения человека.

Целью исследований является повышение точности координатных измерений бортовой цифровой системы стереозрения (ЦСС) автономного мобильного робота, действующего на неизвестной сцене, за счет сглаживающей фильтрации.

Цифровая система стереозрения. Модель измерений. Рассмотрим коллинеарную ЦСС, в которой две цифровые видеокамеры (ВК), находящиеся в разных точках, регистрируют одну и ту же сцену (рис. 1). Пара изображений, получаемых ВК, называется стереопарой. Положим длину базы (отрезка, заключенного между оптическими центрами ВК) равной b . Выберем такую локальную систему координат, начало которой O расположено на базовой линии посередине между оптическими центрами ВК. Пусть ось OZ параллельна оптическим осям ВК $O_{BK1}Z_{BK1}$ и $O_{BK2}Z_{BK2}$, а ось OX направлена вдоль базовой линии. Обе ВК оснащены объективами с одинаковым фокусным расстоянием f и идентичными регистрирующими фотоматрицами.

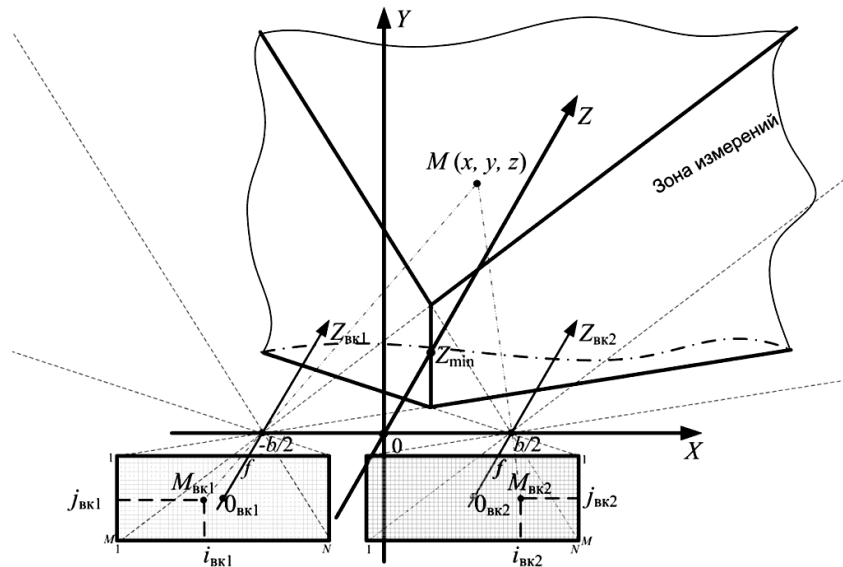


Рис. 1. Цифровая система стереозрения. Модель измерений

Выберем в зоне измерений точку M с локальными координатами (x, y, z) . В силу пиксельной дискретности матрицы цифровых ВК, точка трехмерной сцены $M(x, y, z)$ будет проецироваться в матрице первой (левой) ВК в (i_{BK1}, j_{BK1}) пиксель, а в матрице второй (правой) ВК – в (i_{BK2}, j_{BK2}) пиксель. Назовем эту пару пикселей сопряженными. Точка M может быть выделена на изображениях стереопары посредством цифровой обработки детекторами точечных особенностей [1, 7, 8, 10, 14, 20–23]. Также заметим, что для сопряженных пикселей в рассматриваемой системе справедливо равенство $j_{BK1} = j_{BK2}$. Поэтому для сокращения записи будем обозначать пары смежных пикселей как $\{i_{BK1}, i_{BK2}\}$, вместо более длинного обозначения $\{(i_{BK1}, j_{BK1}), (i_{BK2}, j_{BK2})\}$. Принимаем, что нумерация пикселей в матрице (размером $N \times M$) производится в порядке возрастания от 1 до N по столбцам и до M по строкам, и начинается с верхнего левого угла. Тогда точное положение главной точки в матрицах (O_{BK1} или O_{BK2}) будет определяться, как

$$O_{BK} \left(\frac{N+1}{2}, \frac{M+1}{2} \right).$$

Порядковые номера сопряженных пикселей в фотоматрицах (рис. 1) с проекциями точки трехмерной сцены $M(x, y, z)$ определяются соотношениями

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{BK1}} = \text{Int} \left[\frac{N+1}{2} - \frac{f \frac{x+b/2}{z}}{\Delta_x} \right]; \\ i_{\text{BK2}} = \text{Int} \left[\frac{N+1}{2} - \frac{f \frac{x-b/2}{z}}{\Delta_x} \right]; \\ j_{\text{BK1}} = j_{\text{BK2}} = \text{Int} \left[\frac{M+1}{2} - \frac{f \frac{y}{z}}{\Delta_y} \right], \end{array} \right. \quad (1)$$

где Δ_x , Δ_y ширина и высота пикселя соответственно; функция $\text{Int}[\dots]$ означает целочисленное округление такое, что $\text{Int}[2,2]=2$, а $\text{Int}[2,5]=3$.

Точечные оценки координат положения точки M в локальной системе координат определяются выражениями [2, 16, 17]

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{z} = b \frac{f}{(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}) \Delta_x}; \\ \hat{x} = -b \frac{i_{\text{BK2}} + i_{\text{BK1}} - (N+1)}{2(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}})}; \\ \hat{y} = -b \frac{(j_{\text{BK2}} + j_{\text{BK1}} - (M+1)) \Delta_y}{2(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}) \Delta_x} = b \frac{((M+1) - 2j_{\text{BK1}}) \Delta_y}{2(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}) \Delta_x}, \end{array} \right. \quad (2)$$

При равенстве ширины и высоты пикселей $\Delta_x = \Delta_y$, из (2) находим

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{z} = b \frac{f}{(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}) \Delta_x} = b \frac{f}{d_{\Delta} \Delta_x}; \\ \hat{x} = b \frac{(N+1) - i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}}{2(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}})} = b \frac{(N+1) - i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}}{2d_{\Delta}}; \\ \hat{y} = b \frac{(M+1) - 2j_{\text{BK1}}}{2(i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}})} = b \frac{(M+1) - 2j_{\text{BK1}}}{2d_{\Delta}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Величина $d_{\Delta} = i_{\text{BK2}} - i_{\text{BK1}}$ представляет цифровой (пиксельный) диспаратитет, определенный на интервале целых положительных значений от 1 до $N-1$.

На рис. 2 представлено поле возможных точечных оценок. Наблюдается регулярная симметричная относительно оси OZ структура оценок, общее количество которых составляет $n = \frac{M(N-1)^2}{2}$.

Очевидно, что вокруг каждой оценки, образованной i -й парой смежных пикселей, существует область пространственного разрешения, характеризующая пространство возможных ошибок измерений. С другой стороны, можно говорить о дискретизации пространства сцены при ее реконструкции по изображениям стереопары. Объем областей пространственного разрешения растет с уменьшением

диспаратета, что свидетельствует о том, что удаленные объекты измеряются менее точно по сравнению с близлежащими. Ошибки измерений ε_x , ε_y , ε_z координат точки $M(x, y, z)$ будут определяться

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \hat{x} - x; \\ \varepsilon_y = \hat{y} - y; \\ \varepsilon_z = \hat{z} - z. \end{cases} \quad (4)$$

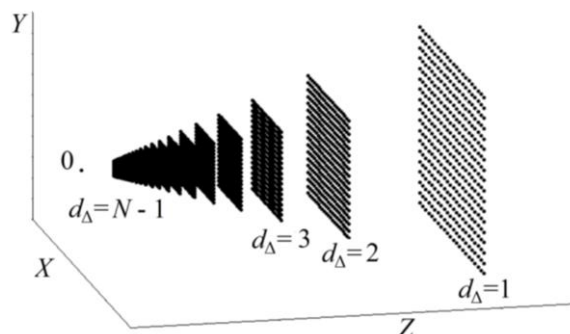


Рис. 2. Поле возможных точечных оценок измерений системы стереозрения

Ошибки измерений ε_x , ε_y , ε_z , в силу неопределенности истинного положения измеряемой точки сцены, носят случайный характер. Стохастическая модель ошибок координатных измерений подробно рассмотрена в [2, 16, 17]. Плотности распределения ошибок измерений унимодальные, однако, для обеспечения их несмещенности и симметрии следует ограничивать измерительное пространство [2, 17] диспаратетом не менее 20 пикселей.

Общая постановка задачи. Рассмотрим систему измерений особенностей внешней среды (сцены), реализованную на подвижной платформе (рис. 3). Внешняя среда, в j -й момент измерений характеризуется совокупностью стационарных точечных особенностей $\{A_i(r_i)\}_j = A_1(r_{1j}), A_2(r_{2j}), \dots, A_i(r_{ij}), \dots, A_n(r_{nj})$ с заранее неизвестным местоположением, выраженным в локальной декартовой системе координат r , жестко связанной с измерителем на подвижной платформе. Измеритель имеет систему стабилизации, компенсирующую угловые отклонения при перемещении платформы по неровной поверхности.

Измерения производятся в дискретные моменты времени, причём вся совокупность измеренных особенностей сцены в j -й момент времени

$$\{A_i(\hat{r}_i)\}_j = A_1(\hat{r}_{1j}), A_2(\hat{r}_{2j}), \dots, A_i(\hat{r}_{ij}), \dots, A_n(\hat{r}_{nj})$$

может характеризоваться совокупностью координатных ошибок

$$\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_j = \varepsilon_1(\hat{r}_{1j}), \varepsilon_2(\hat{r}_{2j}), \dots, \varepsilon_i(\hat{r}_{ij}), \dots, \varepsilon_n(\hat{r}_{nj}), \quad \varepsilon_i(\hat{r}_i)_j = (\hat{r}_i - r_i)_j.$$

Распределение совокупности ошибок измерений в j -й момент времени $\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_j$ известно вплоть до параметров $M[\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_j] = 0$ и $\sigma[\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_j] \leq \sigma_{\text{изм}}$, где $\sigma_{\text{изм}}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок измерений, определяемое параметрами бортового измерителя и выраженное для его локальной системы координат. Также известны параметры распределений ошибок каждой измеряемой особенности сцены на всей дистанции наблюдения (для всех моментов $j = \overline{1, k}$ времён измерений) при перемещении платформы $M[\varepsilon_i(\hat{r}_i)]_{\overline{1, k}} = 0$ и $\sigma[\varepsilon_i(\hat{r}_i)]_{\overline{1, k}} \leq \sigma_{\text{изм}}$.

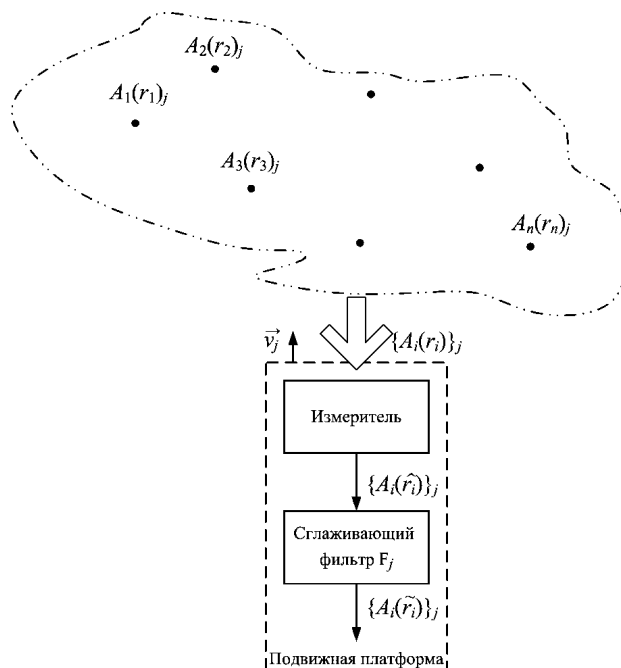


Рис. 3. Повышение точности координатных измерений

Перемещение платформы осуществляется со скоростью v , величина которой в силу неоднородностей среды и воздействующих факторов носит случайный характер. Оценка \hat{v}_j скорости перемещения в j -й момент времени может быть получена, если рассмотреть среднее приращение положения точечных особенностей по совокупности полученных оценок на j -м и $(j-1)$ -м измерениях, или через интервал времени Δt_j между j -м и $(j-1)$ -м моментом измерений

$$\Delta \hat{r}_j = \frac{\{\Delta \hat{r}_i\}_j}{n} = \frac{\{\hat{r}_i\}_j - \{\hat{r}_i\}_{j-1}}{n} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_j - \left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_{j-1}}{n}, \quad \hat{v}_j = \frac{\Delta \hat{r}_j}{\Delta t_j}. \quad (5)$$

Легко показать, что полученная оценка скорости перемещения платформы при $n \rightarrow \infty$ будет совпадать с истинным значением $\hat{v}_j = v_j = \frac{\Delta r_j}{\Delta t_j}$, поскольку $\Delta \hat{r}_j = \Delta r_j$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{r}_j &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_j - \left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_{j-1}}{n} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_j - \left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_{j-1}}{n} - \underbrace{\mathbf{M}\left[\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_j\right]}_{=0} + \underbrace{\mathbf{M}\left[\{\varepsilon_i(\hat{r}_i)\}_{j-1}\right]}_{=0} = \\ &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_j - \left(\sum_{i=1}^n \hat{r}_i\right)_{j-1}}{n} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (\hat{r}_i - r_i)\right)_j}{n} + \frac{\left(\sum_{i=1}^n (\hat{r}_i - r_i)\right)_{j-1}}{n} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n r_i\right)_j - \left(\sum_{i=1}^n r_i\right)_{j-1}}{n} = \Delta r_j. \end{aligned}$$

Сглаживающий фильтр обеспечивает фильтрацию результатов координатных измерений всей совокупности особенностей сцены в каждый j -й момент времени

$$\{A_i(\tilde{r}_i)\}_j = A_1(\tilde{r}_1)_j, A_2(\tilde{r}_2)_j, \dots, A_l(\tilde{r}_l)_j, \dots, A_n(\tilde{r}_n)_j, \quad \tilde{r}_i = F_j(\hat{r}_i),$$

где $F_j(\dots)$ – передаточная функция сглаживающего фильтра в j -й момент времени, определенная для каждой i -й точечной особенности сцены. Совокупность ошибок координатных измерений точечных особенностей сцены после фильтрации в j -й момент времени характеризуются

$$\{\varepsilon_i(\tilde{r}_i)\}_j = \varepsilon_1(\tilde{r}_1)_j, \varepsilon_2(\tilde{r}_2)_j, \dots, \varepsilon_i(\tilde{r}_i)_j, \dots, \varepsilon_n(\tilde{r}_n)_j, \quad \varepsilon_i(\tilde{r}_i)_j = (\tilde{r}_i - r_i)_j.$$

Эффективным будем считать фильтр, обеспечивающий несмещенность при уменьшении СКО сглаженных оценок

$$M[\varepsilon_i(\tilde{r}_i)]_{1,k} = 0 \text{ и } \sigma[\varepsilon_i(\tilde{r}_i)]_{1,k} < \sigma[\varepsilon_i(\hat{r}_i)]_{1,k} \quad (6)$$

на всей дистанции измерений каждой i -й точечной особенности сцены. Следовательно, задача синтеза эффективного фильтра заключается в нахождении $F_{1,k}(\hat{r}_i)$ передаточной функции сглаживающего фильтра для любого момента времени измерений, обеспечивающей выполнение (6).

Оптимальным фильтром будет являться тот, который, обладая определенной на всем интервале измерений передаточной функцией $F_{1,k}(\hat{r}_i)$, обеспечивает

$$\sigma[\varepsilon_i(\tilde{r}_i)]_{1,k} \rightarrow \text{Min} \quad \text{при} \quad M[\varepsilon_i(\tilde{r}_i)]_{1,k} = 0 \quad (7)$$

каждой i -й точечной особенности сцены. Т.е. задача синтеза оптимального фильтра заключается в нахождении $F_{1,k}(\hat{r}_i)$ передаточной функции сглаживающего фильтра для любого момента времени измерений, обеспечивающей (7) минимум СКО ошибок измерений при нулевом математическом ожидании.

Сглаживание координатных измерений на основе фильтра Калмана.

Идея синтеза эффективного рекурсивного фильтра динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений, имеет конкретную реализацию. Фильтр назван в честь венгерского математика Рудольфа Э. Калмана. Фильтр Калмана был впервые описан и частично разработан в работах Сверлинга [6], Калмана [3] и Калмана и Бьюси [11].

Фильтр Калмана – эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений. Он предназначен для рекурсивного дооценивания вектора состояния априорно известной динамической системы. Для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Алгоритм работает в два этапа. На этапе прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе, по данным зашумленного измерения, результат экстраполяции уточняется. Известны решения на основе фильтра Калмана и его модификаций для построения глобальных навигационных систем, показывающие весьма впечатляющие результаты [4, 5]. Однако, для построения навигационных систем локального типа существует ряд проблем, среди которых основной является априорная неопределенность динамической системы. Действительно, для автономного мобильного робота информация о перемещении по сцене может быть получена только опытным путем, за счет измерений сенсорных датчиков, результаты которых могут быть зашумлены [2, 15, 18, 19].

Для иллюстрации сказанного, рассмотрим ситуацию (рис. 4), когда в сцене выделен и наблюдается точечный ориентир M , удаленный от оптической оси OZ системы стереозрения. Платформа движется с постоянной скоростью \vec{v} , причем направление вектора перемещения совпадает с направлением оси OZ ЦСС.

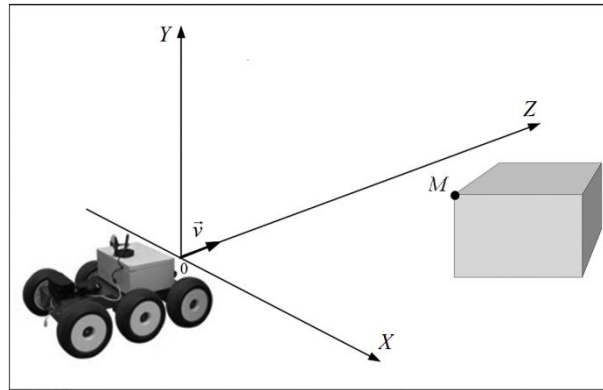


Рис. 4. Модель наблюдения ориентира при перемещении платформы

Для ЦСС со стереобазой – 0,5 м; фокусным расстоянием f видеокамер – 8 мм; размером пикселя 3 мкм и размерами матриц 1600×1200 пикселей (техническая реализация возможна на базе двух мегапиксельных ВК типа В2.920 Beward); начального положения ориентира M (6; 2; 35) (значения в метрах) и траектории перемещения платформы в глубину сцены на 5 м, результаты координатных измерений ориентира M и сглаживания классическим фильтром Калмана представлены на рис. 5. В левой части представлены истинная (обозначение 1), измеренная (обозначение 2) и сглаженная (обозначение 3) траектория ориентира M . В правой части изображены апостериорные плотности распределения вероятности радиуса отклонения ошибок для результатов измерений $f(\hat{R})$ (обозначение 2) и сглаживания $f(\tilde{R})$ (обозначение 3):

$$\hat{R}_i = \sqrt{(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2 + (\hat{z}_i - z_i)^2}; \quad \tilde{R}_i = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_i)^2 + (\tilde{y}_i - y_i)^2 + (\tilde{z}_i - z_i)^2}.$$

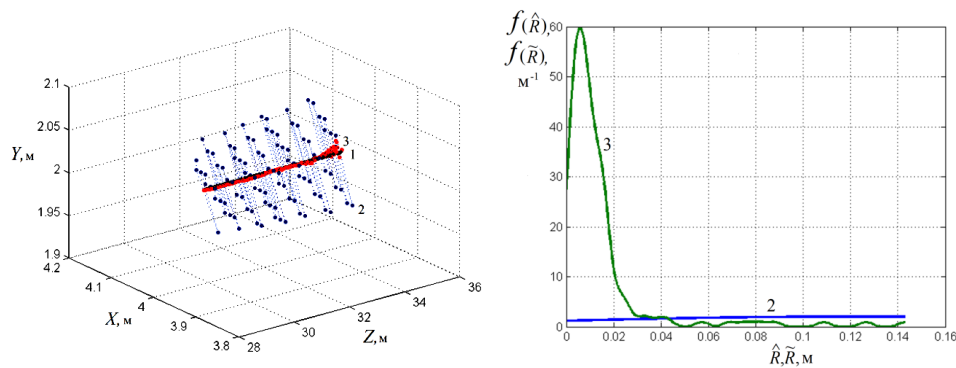


Рис. 5. Результаты модельного расчета при точной модели эволюции (экстраполяции) системы

Результаты, представленные на рис. 5, получены для априорно известной динамической системы и характеризуют идеализированный случай. Наблюдается довольно быстрая сходимость траектории сглаженных измерений ориентира M к истинной траектории, несмотря на существенные ошибки текущих измерений.

На практике модель динамической системы априорно неизвестна в силу ряда объективных причин. К числу таковых можно причислить шумы сенсорных датчиков, используемых для оценки перемещения, недостаточная стабилизация ЦСС

при движении платформы по неровной поверхности и ряд других. К примеру, известно, что одометрические датчики склонны в силу инерционности к накоплению ошибок измерений. На рис. 6 и 7 приведены примеры задания динамической системы с использованием одометрического датчика с систематической ошибкой определения перемещений в 0,5 % и 1 % соответственно. И хотя в первом случае (рис. 6) наблюдается слабое подобие эффективной фильтрации, то во втором случае (рис. 7) результаты фильтрации наоборот существенно увеличивают ошибки координатных измерений.

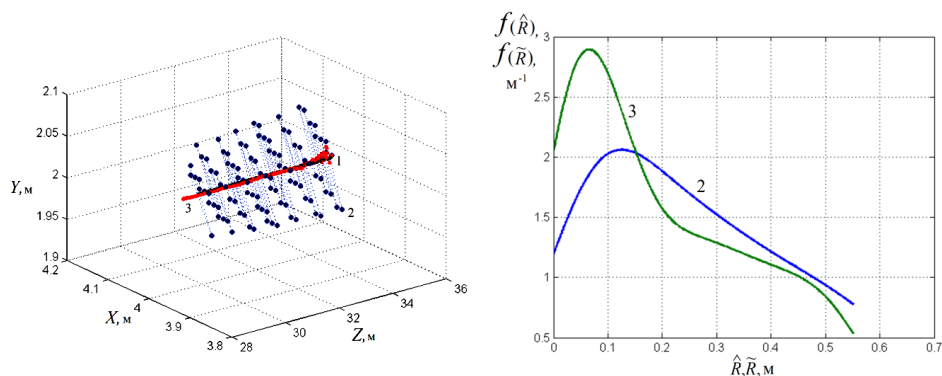


Рис. 6. Результаты модельного расчета при систематической ошибке в модели эволюции (экстраполяции) системы в 0,5 %

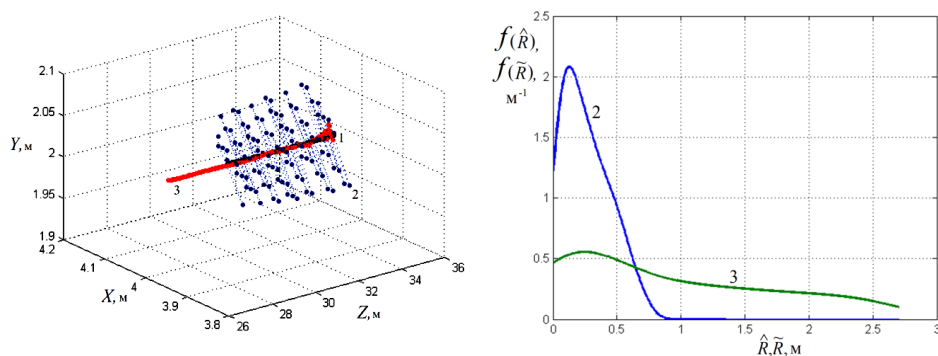


Рис. 7. Результаты модельного расчета при систематической ошибке в модели эволюции (экстраполяции) системы в 1 %

Приведенные результаты свидетельствуют о проблеме устойчивости калмановской фильтрации применительно к бортовым системам навигации. При неточной модели экстраполяции системы необходимо обеспечить несмещенность прогнозных расчетов. Этого можно достичь, если для прогноза эволюции системы использовать приращения сглаженных координатных измерений, или использовать выражение (5) при сопровождении большого количества ориентиров. В этом случае ЦСС становится самодостаточной измерительной системой, обеспечивая эффективную фильтрацию координатных измерений без использования данных иных бортовых сенсоров.

При недостаточной стабилизации платформы мобильного робота без применения дополнительных данных от датчиков ориентации и одометрии не обойтись. Во избежание случаев накопления ошибки в экстраполяционной модели состояния

системы простейшим решением будет периодическое «обнуление» фильтра Калмана. Такая процедура будет приводить к кратковременной потере точности сглаженных оценок, но позволит избежать существенных расхождений получаемых оценок при длительном наблюдении.

Заключение. Эффективными сенсорными системами автономных мобильных роботов являются бортовые цифровые системы стереозрения. Эффективность обусловлена высокой информативностью сигнала видеокамер, что делает возможным не только производить детальное изучение сцены в видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном диапазонах, но и осуществлять необходимые измерения.

Установлено, что применением процедур сглаживающей фильтрации можно существенно повысить точность координатных измерений бортовой системы цифрового стереозрения.

Для обеспечения устойчивости фильтрации результатов измерений модель эволюции системы должна обеспечивать несмещенность прогнозных расчетов. Это достигается стабилизацией цифровой системы стереозрения на борту подвижной платформы и сопровождением достаточного количества особенностей сцены. Таким образом, цифровые системы стереозрения являются самодостаточными измерительными системами, обеспечивая высокую точность одометрии посредством эффективной фильтрации координатных измерений без использования данных иных бортовых сенсоров.

Результаты исследований могут быть использованы для построения систем автономной навигации и позиционирования на основе систем технического зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Harris C. and Stephens M.* A combined corner and edge detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. – 1988. – P. 147-151.
2. *Rumyantsev K.E., Kravtsov S.V.* Positioning autonomous mobile robot based on measurements onboard digital stereo vision system // International Journal of Robotics Applications and Technologies (IJRAT). – July-December 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 37-77.
3. *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering 82 (Series D). – 1960. – P. 35-45.
4. *Maimone M., Cheng Y., Matthies L.* Two years of visual odometry on the Mars Exploration Rovers // Journal of Field Robotics, Special Issue on Space Robotics. – March 2007. – Vol. 24, No. 3. – P. 169-186.
5. *Mikolajczyk K.* Detection of local features invariant to affine transformations, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 2002.
6. *Swering P.* First order error propagation in a stage wise smoothing procedure of satellite observations // J. Astronautical science. – 1959. – Vol. 6. – P. 46-52.
7. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений в среде MATLAB: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
9. *Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И.* Телевизионные измерительные системы. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
10. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
11. *Калман Р.Е., Бьюси Р.С.* Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер.-Д. 83. – 1961. – № I. – С. 95-108.
12. *Кемурджиан Л.А., Громов В.В., Кажукало И.Ф. и др.* Планетоходы / Под ред. Л.А. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
13. *Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г.* Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
14. *Прэт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.

15. Радиотехнические и телевизионные средства сбора и обработки информации // Сборник научных статей / Под ред. К.Е. Румянцева. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 162 с.
16. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трехмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 38-48.
17. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ ошибок измерений глубины точек трехмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 83-93.
18. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Исследование параметрической связи динамики мобильного робота и бортовой бинокулярной системы технического зрения методом спектрального анализа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 9. – С. 15-18.
19. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Оптимизация выбора пар ориентиров для позиционирования по данным измерений цифровой телевизионной системы стереозрения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 12-21.
20. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
21. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
22. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение: Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
23. Яне Б. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

REFERENCES

1. Harris C. and Stephens M. A combined corner and edge detector, *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988, pp. 147-151.
2. Rumyantsev K.E., Kravtsov S.V. Positioning autonomous mobile robot based on measurements onboard digital stereo vision system, *International Journal of Robotics Applications and Technologies (IJRAT)*, July-December 2014, Vol. 2, No. 2, pp. 37-77.
3. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems, *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering 82 (Series D)*, 1960, pp. 35-45.
4. Maimone M., Cheng Y., Matthies L. Two years of visual odometry on the Mars Exploration Rovers, *Journal of Field Robotics, Special Issue on Space Robotics*, March 2007, Vol. 24, No. 3, pp. 169-186.
5. Mikolajczyk K. Detection of local features invariant to affine transformations, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 2002.
6. Swerling P. First order error propagation in a stage wise smoothing procedure of satellite observations, *J. Astronautical science*, 1959, Vol. 6, pp. 46-52.
7. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]: Trans. from English. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
8. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB [Digital Image Processing environment MATLAB]: Trans. from English. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 616 p.
9. Gorelik S.L., Kats B.M., Kivrin V.I. Televizionnye izmeritel'nye sistemy [Television measuring systems]. Moscow: Svyaz', 1980, 168 p.
10. Duda R., Khart P. Raspoznavanie obrazov i analiz stsen [Detection and Scene Analysis]: Trans. from English. M.: Mir, 1976, 511 p.
11. Kalman R.E., Byosi R.S. Novye rezultaty v lineynoy fil'tratsii i teorii predskazyvaniya [New results in the theory of linear filtering and predicting], *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov* [Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers]. Series -D. 83, 1961, No. I, pp. 95-108.
12. Kemurdzhian L.A., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. i dr. Planetokhody [Planetary], Ed. by L.A. Kemurdzhiana. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 400 p.
13. Moshkin V.I., Petrov A.A., Titov V.S., Yakushenkov Yu.G. Tekhnicheskoe zrenie robotov [Technical robot vision]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 272 p.
14. Pret U. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]: Trans. from English. Moscow: Mir, 1982. Book 1, 312 p.

15. Radiotekhnicheskie i televizionnye sredstva sbora i obrabotki informatsii [Radio engineering and television means of collecting and processing], *Sbornik nauchnykh statey* [Collection of scientific articles], Ed. by K.E. Rummyantseva. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 162 p.
16. *Rummyantsev K.E., Kravtsov S.V.* Analiz izmeritel'nogo prostranstva tsifrovoy televizionnoy stereoskopicheskoy sistemy. Tochechnoe i interval'noe otsenivanie koordinat toчек trekhmernoy stseny [Analysis of measuring space stereoscopic digital television system. Spot and interval estimation of the three-dimensional coordinates of the points of the scene], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and Information Complexes and Systems], 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 38-48.
17. *Rummyantsev K.E., Kravtsov S.V.* Analiz oshibok izmereniy glubiny toчек trekhmernoy stseny tsifrovoy televizionnoy stereoskopicheskoy sistemoy [Analysis of measurement error of depth points of a three-dimensional scene of digital stereoscopic television system], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2011, No. 9, pp. 83-93.
18. *Rummyantsev K.E., Kravtsov S.V.* Issledovanie parametricheskoy svyazi dinamiki mobil'nogo robota i bortovoy binokulyarnoy sistemy tekhnicheskogo zreniya metodom spektral'nogo analiza [Investigation of parametric coupling of the dynamics of the mobile robot and the onboard binocular vision system spectral analysis], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, No. 9, pp. 15-18.
19. *Rummyantsev K.E., Kravtsov S.V.* Optimizatsiya vybora par orientirov dlya pozitsionirovaniya po dannym izmereniy tsifrovoy televizionnoy sistemy stereozreniya [Optimization of selecting pairs of reference points for the positioning of the measurement data of digital TV system stereo vision], *Elektro-tekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and Information Complexes and Systems], 2012, Vol. 8, No. 4, pp. 12-21.
20. *Soyfer V.A.* Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of computer image processing], Ed. by V.A. Soyfera. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2003, 784 p.
21. *Forsayt D., Pons Zh.* Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod [Computer vision. Modern Approach]: Trans. from English. Moscow: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2004, 928 p.
22. *Shapiro L., Stokman Dz.* Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]: Trans. from English. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 752 p.
23. *Yane B.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]: Trans. from English. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 584 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

Кравцов Сергей Валентинович – Южный федеральный университет; e-mail: krsvtg@rambler.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; доцент.

Kravtsov Sergey Valentinovich – Southern Federal University; e-mail: krsvtg@rambler.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; associate professor.