

УДК 004.93'12

В.Е. Дементьев, Х.А. Абдулкадим

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ¹

Дементьев Виталий Евгеньевич, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета, доцент кафедры «Телекоммуникации» УлГТУ. Имеет монографию, статьи и патенты в областях статистической обработки многомерных сигналов и защиты информации. [e-mail: vkk@ulstu.ru].

Абдулкадим Хуссейн Абдуламир, аспирант кафедры «Телекоммуникации» УлГТУ, окончил магистратуру и получил степень магистра в области техники связи в Технологическом университете Багдада (Ирак), работал преподавателем инженерного колледжа университета Диялы. Имеет статьи в области связи и радионавигации. [e-mail: hussein73@mail.ru].

Аннотация

Оценивание координат автономного летательного аппарата является важной задачей, необходимой для автоматического управления. С развитием технологий цифровой обработки изображений стало возможным решить эту задачу с помощью обработки информации, получаемой от различных, установленных на борту и регистрирующих окружающую среду устройств. Подобный подход имеет ряд преимуществ перед известными решениями, связанными с использованием спутниковых или инерциальных навигационных систем. Среди преимуществ можно отметить возможность работы в условиях отсутствия сигналов спутниковой навигации и низкую погрешность позиционирования, мало зависящую от длины и характера траектории движения. В работе представлены некоторые результаты синтеза и анализа алгоритмов навигации автономного аппарата с использованием только пространственного дальномера. Показано, что точность такой навигации достаточна для многих практических приложений. Проанализированы пути реализации процедур позиционирования на основе использования существующих образцов вычислительной техники.

Ключевые слова: автономные летательные аппараты, оценивание координат, позиционирование, обработка изображений.

ALGORITHMS OF ESTIMATING COORDINATES OF AERIAL VEHICLES USING SPATIAL RANGEFINDERS

Vitalii Evgenevich Dementiev, Candidate of Engineering, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Telecommunications of Ulyanovsk State Technical University; an author of a monograph, articles and patents in the field of statistical processing of multidimensional signals and information security. e-mail: vkk@ulstu.ru.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 16-41-732053 и № 16-41-730124.

Hussein Abdulameer Abdulkadhim, Postgraduate Student at the Department of Telecommunications of Ulyanovsk State Technical University; finished his postgraduate studies and got a Master's Degree in Communication Engineering in the University of Technology in Baghdad (Iraq) and worked as an Assistant Lecturer in College of Engineering of Diyala University; an author of articles in the field of communication and radio-navigation engineering. e-mail: hussein73@mail.ru.

Abstract

Estimation of coordinates of an autonomous aircraft is an important task that is necessary for automatic control. With the development of digital image processing technologies, it has become possible to solve this problem by processing the information obtained from the various devices installed on board and registering the environment. The approach has several advantages over the known solutions associated with the use of satellite and inertial navigation systems. Among the advantages, the authors note the possibility of work in the absence of signals of satellite navigation and low error of positioning that is in little dependence on length and status of the motion path. The article presents some results of synthesis and analysis of the navigation algorithms of an autonomous aircraft using only a spatial rangefinder. The article also shows that the accuracy of such navigation is sufficient for many practical applications. The ways of the positioning procedures are analyzed through the use of existing samples of computing.

Key words: autonomous aircrafts, estimation of coordinates, positioning, image processing.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество потребительских устройств, позволяющих регистрировать изображения. Современные варианты таких устройств отличаются малым размером, низкой стоимостью и высоким качеством получаемых изображений. Это существенно расширяет область применения устройств регистрации изображений, позволяя решать задачи, для которых обычно используются сложные специализированные системы. К таким задачам, в частности, относится задача навигации и управления автономным объектом [1, 2]. Позиционирование подвижного автономного объекта осуществляется, как правило, с помощью комбинации спутниковых и инерциальных навигационных систем. Однако эти системы имеют недостатки, препятствующие их применению в ряде задач [1, 3, 4]. В настоящей работе рассматривается способ навигации автономного аппарата с помощью пространственного дальномера. Примером такого дальномера является, например, доступный на рынке контроллер Microsoft Kinect. В состав этого устройства входят как пассивные, так и активные датчики изображений, что позволяет существенно расширить возможности его применения.

АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ

Будем считать, что на борту управляемого аппарата вдоль его продольной оси установлен пространственный инфракрасный дальномер (рис. 1).

Данные, полученные от дальномера, представляют собой двумерные массивы размером $M \times N$, содержащие информацию о расстоянии до наблюдаемых объектов. Эта информация формируется на основе временных задержек сигнала в инфракрасном диапазоне. Массивы таких задержек можно преобразовать в изображения, так что яркость пикселя будет соответствовать расстоянию между аппаратом и регистрируемым объектом [1, 2, 5]. При этом расстояния до наиболее близких и далеких объектов регистрируются со значительной погрешностью и часто

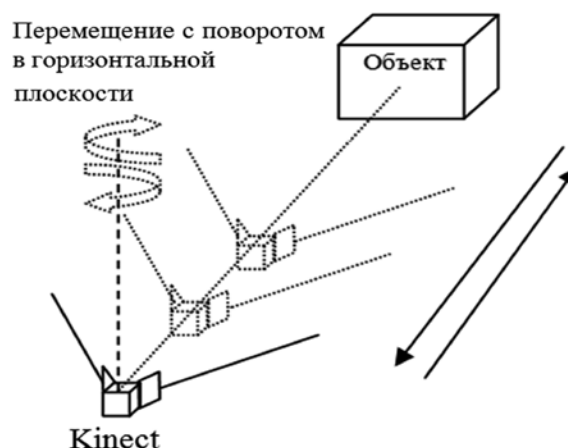


Рис. 1. Процесс регистрации данных

приравниваются к нулю или максимальному значению соответственно. Это связано с особенностями процесса получения данных с инфракрасного дальномера [1, 5].

Для решения задачи позиционирования будем считать, что дальномер направлен вперед вдоль оси летательного аппарата, перемещение которого происходит без поворотов и кренов с достаточно малой скоростью (разница между получаемыми кадрами изображений незначительная), горизонтальный и вертикальный углы обзора равны α . Тогда горизонтальное и вертикальное угловое разрешение составляют соответственно:

$$H_x = \frac{\alpha}{\max_i} \text{ и } H_y = \frac{\alpha}{\max_j},$$

где \max_i, \max_j – пространственные разрешения обрабатываемых изображений по горизонтали и вертикали соответственно. Если, например, $\alpha = 120^\circ$, $\max_i = 320$, $\max_j = 240$, то $H_x = 120/320 = 0,375^\circ$, $H_y = 120/240 = 0,5^\circ$.

Пусть начальные координаты аппарата равны нулю и на изображении наблюдается некоторый объект (рис. 2). Методы обработки изображений позволяют выделить объект на первом изображении Z^1 видеопоследовательности



Рис. 2. Изображение, получаемое с помощью пространственного дальномера

и определить координаты его геометрического центра $i_{об}^1, j_{об}^1$. Если измеренное расстояние до объекта в точке $i_{об}^1, j_{об}^1$ составляет ρ , то можно определить координаты этого объекта с помощью простого геометрического преобразования:

$$\left. \begin{aligned} x_{об} &= x_0 - \rho \cdot \sin(\vartheta_x) \\ y_{об} &= y_0 - \rho \cdot \cos(\vartheta_y) \end{aligned} \right\}$$

где $\vartheta_x = \Delta i \cdot H_x, \vartheta_y = \Delta j \cdot H_y$ – горизонтальный и вертикальный углы обзора объекта;

$\Delta i = \max_i / 2 - i_{об}^1, \Delta j = \max_j / 2 - j_{об}^1$ – расстояния в пикселях между центром объекта и центром изображения.

В следующий момент времени получаем второе изображение Z^2 с инфракрасного дальномера. Если смещение аппарата к этому моменту относительно мало, то для его определения можно воспользоваться псевдоградиентными алгоритмами [6–8]. По результатам привязки двух полученных кадров изображений получим вектор параметров деформаций: смещение по горизонтали (Δx), смещение по вертикали (Δy), угол поворота ($\Delta \theta$) и масштаб (ΔM). Связь этих величин с исходным кадром может быть описана некоторым выражением [1–4, 8]: $Z^2 = f(Z^1, \Delta x, \Delta y, \Delta M, \Delta \theta)$, которое позволяет выполнять прогноз положения центра $i_{об}^2, j_{об}^2$ объекта на втором кадре без выполнения операции его обнаружения.

Тогда новые координаты самого аппарата в момент регистрации второго кадра составяют:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_{об} - \rho^2 \cdot \sin(\vartheta_x^2) \\ y_2 &= y_{об} - \rho^2 \cdot \cos(\vartheta_y^2) \end{aligned} \right\}$$

где ρ^2 – расстояние между аппаратом и объектом на втором кадре;

$\vartheta_x^2, \vartheta_y^2$ – горизонтальный и вертикальный углы обзора объекта.

В случае наблюдения нескольких объектов оценка их координат будет выполняться аналогичным образом. Полученные таким образом оценки координат аппарата можно усреднить. Для увеличения точности при усреднении можно использовать специальные коэффициенты, зависящие, например, от расстояния от центра регистрируемого изображения до центра идентифицируемого объекта. В случае незначительных изменений на изображениях (медленных перемещениях аппарата) оценку элементарных перемещений можно производить не только последовательно от кадра к кадру, но через некоторое количество кадров.

Для получения траектории перемещения аппарата достаточно выполнить сложение полученных таким образом элементарных смещений:

$$\left. \begin{aligned} x_{total} &= x_1 + x_2 + x_3 + \dots, \\ y_{total} &= y_1 + y_2 + y_3 + \dots \end{aligned} \right\}$$

Анализ алгоритмов навигации

Для проведения исследования точности разработанных алгоритмов было реализовано специальное программное обеспечение, моделирующее 3D-сцену с размещенными на ней объектами разного рода и размера. При перемещении аппарата формируется последовательность чисел, имитирующих данные пространственного дальномера. Эти данные и результаты их преобразования в изображения обрабатываются с помощью предложенного алгоритма.

Рассмотрим сравнение двух случаев, когда объект находится в фокусе дальномера и когда он смещен влево (рис. 3)



(а) Объект находится в фокусе дальномера



(б) Объект смещен влево

Рис. 3. Примеры изображений с объектом привязки

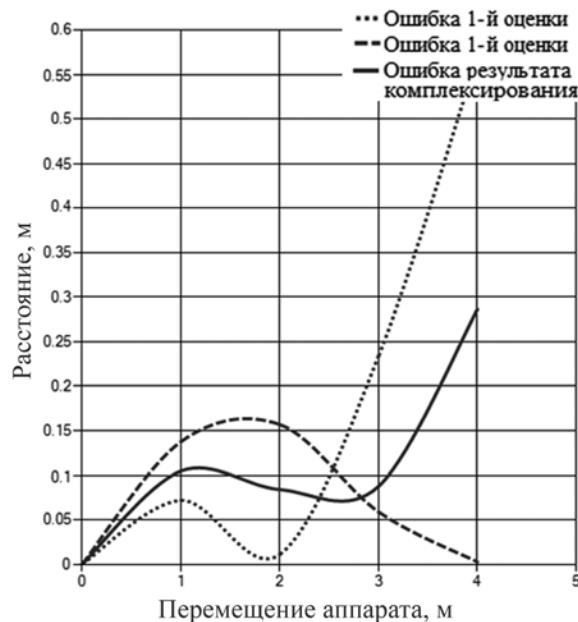
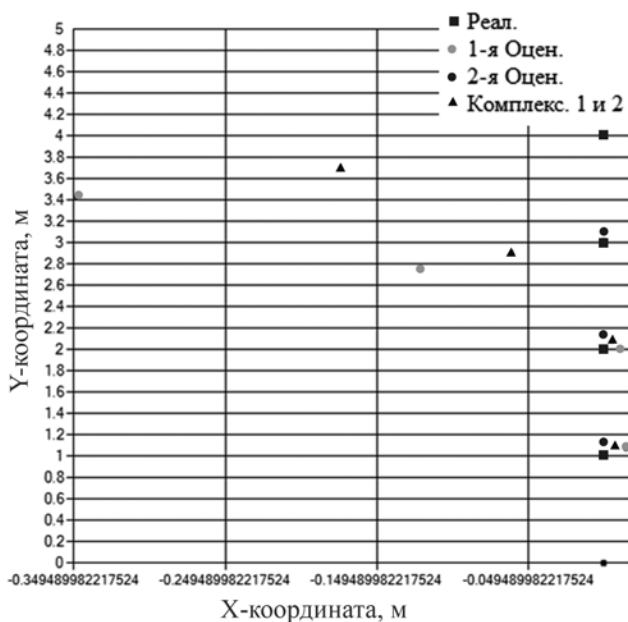


Рис. 4. Результаты оценивания координаты аппарата и абсолютная погрешность оценивания



Рис. 5. Зависимость ошибки оценивания при удалении объекта от центра изображения

Для исследования погрешностей, возникающих при смещении наблюдаемого объекта относительно центра камеры, была проведена представительная серия испытаний, заключающихся в большом количестве виртуальных «пролетов» аппарата над 3D-сценой при разных начальных координатах наблюдаемого объекта. На рисунке 5 представлена зависимость погрешности оценивания от смещения объекта относительно центра изображения.

Полученная кривая близка к экспоненциальной. Значения найденной дисперсии погрешности можно использовать при комплексировании результатов оценивания по большому количеству объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье представлены некоторые результаты исследования возможности оценивания координат автономного летательного аппарата относительно объектов разной природы на основании результатов обработки последовательности изображений, полученных с пространственного дальномера. Установлено, что точность позиционирования автономного аппарата зависит от количества, размера и размещения наблюдаемых объектов. Показано, что средняя погрешность навигации, возникающая при использовании предложенных процедур, составляет в среднем 0,3 метра. При этом важно, что возрастание этой погрешности с увеличением пройденной дистанции можно ограничить использованием динамических или априорно заданных карт местности.

На рисунке 4 приведены результаты оценивания координат аппарата относительно первого и второго объектов и окончательный результат, полученный за счет комплексирования результатов обработки по двум объектам при условном перемещении вперед на 4 единицы. На графиках показаны абсолютные ошибки оценивания, возникающие при таком движении.

Анализ кривых на графиках показывает, что возникающая при оценивании погрешность возрастает немонотонно, как, например, в инерциальных навигационных системах. Ее значение зависит главным образом от погрешностей, возникающих при поиске объектов на изображении и псевдоградиентной оценке их смещений. Некоторая стабилизация достигается за счет оценивания «через несколько кадров».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев К.К., Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А. Разработка алгоритма навигации на основе данных инфракрасного дальномера Kinect // Матер. междунар. конф. REDS-2015. – М., 2015. – С. 116–118.
2. Абдулкадим Х.А. Особенности совмещения изображений, полученных с помощью пространственного инфракрасного дальномера Kinect // Сб. научн. тр. девятой всерос. научн.-практ. конф. «Проектирование и эксплуатация радиотехнических систем». – Ульяновск : Изд-во УЛГТУ, 2015. – С. 89–91
3. Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А., Френкель А.Г. Разработка и анализ алгоритмов оценивания траектории автономных летательных аппаратов по результатам обработки изображений окружающих объектов // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 27–30.
4. Grzegorz Jóźków, Charles Toth, Zoltan Koppanyi and Dorota Grejner-Brzezinska, Combined Matching Of 2d And 3d Kinect™ Data To Support Indoor Mapping And Navigation // ASPRS 2014 Annual Conference, Louisville, Kentucky, March 23–28, 2014, USA, pp. 164–174.
5. Prabhakar N., Vaithyanathan V., Akshaya Prakash Sharma, Anurag Singh and Pulkit Singhal Object Tracking Using Frame Differencing and Template Matching // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Maxwell Scientific Organization, ISSN: 2040–7467, 2012, pp. 5497–5501.
6. Rajvi Shah and P.J. Narayanan, Trajectory Based Video Object Manipulation // IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Barcelona, 11–15 July 2011, pp. 1–4.
7. Абдулкадим Х.А. Анализ изображений, получаемых с бортовой камеры беспилотного летательного аппарата для его навигации // Сб. тр. всерос. конф. КИИ-2014. – Казань, 2014. – Т. 3 – С. 243–248.
8. Tashlinskii A.G. Pseudogradient Estimation of Digital Images Interframe Geometrical Deformations // Vision Systems: Segmentation & Pattern Recognition. Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2007. – pp. 465–494.

REFERENCES

1. Vasiliev K.K., Dementev V.E., Abdulkadim H.A. Razrabotka algoritma navigatsii na osnove dannykh infrakrasnogo dalnamera Kinect [Navigation Algorithm Design based on the Kinect IR Rangefinder Data]. *Mater. mezhdunar. konf. REDS-2015* [Proc. of the Int. Sci. Conf. REDS-2015]. Moscow, 2015, pp. 116–118.
2. Abdulkadim H.A. Osobennosti sovmeshcheniia izobrazhenii, poluchennykh s pomoshchiu prostranstvennogo infrakrasnogo dalnamera Kinect [Registration Characteristics of Images Obtained Using the Kinect IR Rangefinder]. *Sb. nauchn. tr. deviatoi vseros. nauchn.-prakt. konf. "Proektirovanie i ekspluatatsiia radiotekhnicheskikh sistem"* [Proc. of the 9th Russian Sci Conf. "Radio System Development and Operation"]. Ulyanovsk, USGTU Publ., 2015, pp. 89–91
3. Dementiev V.E., Abdulkadim Kh.A., Frenkel A.G. Razrabotka i analiz algoritmov otsenivaniia traektorii avtonomnykh letatelnykh apparatov po rezul'tatam obrabotki izobrazhenii okruzhaiushchikh obektov [Development and Analysis Algorithm of Estimation Trajectory of Autonomous Aerial Vehicles by Results of Image Processing of the Surrounding]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2016, no. 9, pp. 27–30.
4. Grzegorz Jóźków, Charles Toth, Zoltan Koppanyi and Dorota Grejner-Brzezinska, Combined Matching Of 2d And 3d Kinect™ Data To Support Indoor Mapping And Navigation. *ASPRS 2014 Annual Conference*. Louisville, Kentucky, March 23–28, 2014, USA, pp. 164–174.
5. Prabhakar N., Vaithyanathan V., Akshaya Prakash Sharma, Anurag Singh and Pulkit Singhal Object Tracking Using Frame Differencing and Template Matching. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Maxwell Scientific Organization, ISSN: 2040–7467, 2012, pp. 5497–5501.
6. Rajvi Shah and P.J. Narayanan, Trajectory Based Video Object Manipulation. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. Barcelona, 11–15 July, 2011, pp. 1–4.
7. Abdulkadim H.A. Analiz izobrazhenii, poluchaemykh s bortovoi kamery bespilotnogo letatel'nogo apparata dlia ego navigatsii [Analysis of Images from Unmanned Aerial Vehicle Camera for Its Navigation]. *Sb. tr. vseros. konf. KII-2014* [Proc. of Russian Sci. Conf. KII-2014]. Kazan, 2014, vol. 3, pp. 243–248.
8. Tashlinskii A.G. Pseudogradient Estimation of Digital Images Interframe Geometrical Deformations. *Vision Systems: Segmentation & Pattern Recognition*, Vienna, Austria, I-Tech Education and Publishing Publ., 2007, pp. 465–494.