

УДК 681.513.3

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ ПРИ МАЛОВЫСОТНЫХ ПОЛЕТАХ

*Балашов О.Е., к.т.н., доцент кафедры АИТУ Рязанского государственного радиотехнического университета,  
e-mail: aitu@rsreu.ru.*

### OBSTACLE DETECTION ALGORITHM AT LOW-ALTITUDE FLIGHT

*Balashov O.E.*

*The problem of detection of ground obstacle at low-altitude flight is described in this paper. It presents an algorithm to measure the distance between the aircraft and the obstacle using one video sensor. Obstacle detection is based on the analyses of coordinates of feature points at the image sequence. Points lying above the earth's surface considered to be an obstacle and calculate the times to collision to them.*

**Keywords:** obstacle detection, time to collision, measurement of distance to objects.

**Ключевые слова:** оптико-механическая система, обнаружение препятствий, расстояние до объектов.

#### Введение. Постановка задачи

При выполнении полетов над населенными пунктами на малой высоте большую опасность для летательных аппаратов с точки зрения столкновения представляют высотные сооружения (опоры мостов, высотные здания, столбы и т.п.). Для уменьшения опасности полетов целесообразно использовать системы помощи, которые способны заблаговременно предупредить пилота о приближении летательного аппарата к высотному препятствию. Системы предупреждения столкновений могут строиться на базе различных датчиков, выдающих информацию об окружающем пространстве. В данной статье рассматривается подход, позволяющий оценить расстояние до наземных объектов с помощью обработки последовательности видеок кадров, сформированных одним видеодатчиком (ВД). На основании информации о дальности до высотных сооружений система предупреждения столкновений способна принимать решение об опасности полета и может выдавать пилоту предупреждения о препятствии и советы по маневрированию для предотвращения столкновения.

Обнаружение и оценка параметров препятствий основаны на анализе координат точек наблюдаемых объектов в последовательности видеок кадров. Для обнаружения и выделения точек объектов в последовательности изображений необходимо чтобы их изображения обладали какими-либо отличительными признаками, то есть точки должны быть ключевыми. Существуют многочисленные точечные операторы (детекторы ключевых точек), предназначенные для выделения особых (характерных) точек на изображении. Для большинства возможных типов препятствий изображения, содержащие границы высотных сооружений и фоновых объектов, будут иметь угловые точки. Поэтому для обнаружения препятствий удобно использовать детекторы углов, например, детектор Харриса [1]. Благодаря анализу то-

*Рассматривается один из возможных способов оценки расстояния между летательным аппаратом, являющимся носителем оптико-механической системы, и наземным высотным сооружениями. Приводится алгоритм вычисления пространственных координат объектов с использованием одного видеодатчика.*

чек, лежащих на краях изображений препятствий, возможно более точное оценивание геометрических параметров препятствий, по сравнению с вариантом, когда анализируются ключевые точки, лежащие только внутри (не на границе) изображения высотного сооружения.

Для обнаружения препятствий носитель вместе с ВД должен совершать поступательное движение. В результате будем иметь последовательность изображений, содержащих изображения объектов (препятствий) с разных ракурсов (рис. 1).

Системы предупреждения столкновений удобно строить на базе бортовых оптико-механических систем (ОМС), предназначенных для сопровождения объектов, мониторинга окружающей обстановки [2-4]. Видеодатчик в ОМС обычно крепится на внутренней рамке карданного подвеса, устанавливаемого в носовой части носителя (летательного аппарата) (рис. 2). Будем считать, что в моменты формирования видеок кадров система предупреждения столкновений обладает информацией о скорости движения носителя, его координатах и ориентации в пространстве. Также будем считать известными углы поворота рамок кардана (угловые координаты оптической оси ВД)  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  относительно носителя. Данная информация может поступать в рассматриваемую систему с бортовой навигационной аппаратуры и датчиков углов поворота рамок кардана.

На рис. 2, а изображен вариант ОМС с трехосным карданным подвесом. Для обнаружения препятствий также могут использоваться ОМС с двухосными карданами. Вращение ВД относительно носителя осуществляется оператором или какими-либо бортовыми системами, например, системой автоматического сопровождения объектов по видеоданным [2, 5, 6].

Задача обнаружения препятствий перед летатель-

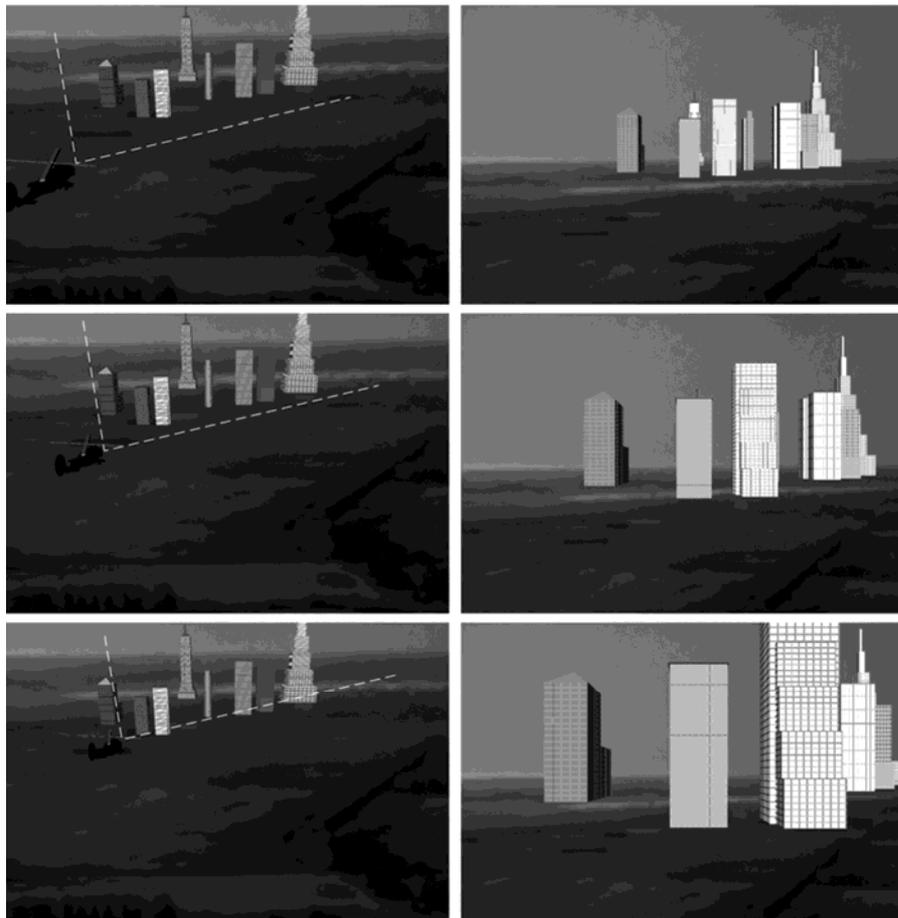


Рис. 1. Пример движения носителя и обрабатываемых изображений

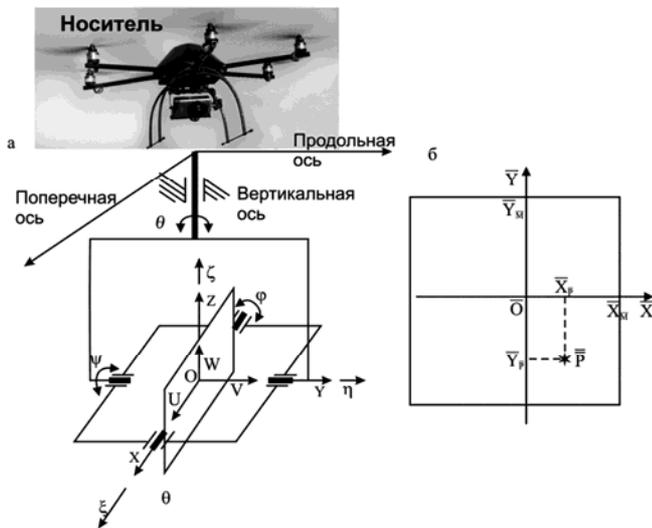


Рис. 2. Крепление ВД на носителе ОМС

ным аппаратом может решаться как при вращающемся ВД, так и при отсутствии вращения рамок кардана. В некоторых случаях ВД может быть жестко закреплен на носителе, тогда углы поворота рамок кардана  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  имеют постоянные значения.

### Алгоритм обнаружения и измерения параметров препятствий

При выполнении маловысотных полетов обнаружение наземных препятствий возможно путем анализа в последовательности изображений координат пикселей,

являющихся изображением объектов. Для слеживания за точками объекта в последовательности кадров удобно использовать ключевые точки изображения, выделяемые детектором углов. На рис. 3 показан пример анализируемого изображения, на котором показаны ключевые точки и смещение точек между двумя кадрами.



Рис. 3. Анализируемое изображение

Рассмотрим некоторое высотное сооружение, одну его из точек, выделяемую на изображении как ключевую, обозначим  $P$ . На рис. 2, а показан вариант трехосного карданного подвеса, расположенного на носителе, с изображением соответствующих систем координат. Положение системы координат  $OUVW$ , жестко связанной с ВД, относительно носителя определяется углами поворота рамок карданного подвеса ( $\theta$  – угол азимута,  $\varphi$  –

угол места,  $\psi$  – угол крена). Направление оптической оси ВД совпадает с осью  $OV$ . Система координат  $O\xi\eta\zeta$  неподвижно ориентирована относительно поверхности земли так, что плоскость  $O\xi\eta$  параллельна плоскости горизонта, а ось  $O\xi$  образует правую систему координат с плоскостью  $O\xi\eta$ . Положение системы координат носителя  $OXYZ$ , образуемой строительными осями носителя, относительно  $O\xi\eta\zeta$  определяется углами качки ( $\alpha$  – угол рысканья,  $\beta$  – тангажа,  $\gamma$  – крена). При отсутствии качки носителя и равенстве нулю углов поворота рамок карданного подвеса  $\theta, \phi$  и  $\psi$  все указанные системы координат совпадают. Пусть текущим значениям  $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \phi, \psi$  соответствует плоское изображение, получаемое с ВД и представленное на рис. 2, б, где отрезок  $\overline{OP}$  определяет положение анализируемой точки  $P$ .

В качестве модели изображения с угловым полем зрения  $2X_M \times 2Y_M$  примем изображение  $ABCD$  (рис. 4) размером  $2N_{XM} \times 2N_{YM}$ , формируемое на плоскости, перпендикулярной оптической оси видеодатчика  $OV$  и расположенной на расстоянии  $R$  от оптического центра ВД [7]. Размер изображения в пикселях равен  $2N_{XM} \times 2N_{YM}$ . При этом предполагается, что любая произвольная точка изображения  $ABCD$  воспринимает лишь световой поток, проходящий через заданную точку и центр  $O$  оптической системы. Пусть анализируемой точки объекта на изображении  $ABCD$  соответствует пиксель  $P_1$  с координатами  $NXP, NYP$ . Направление на анализируемую точку в момент времени, соответствующий формированию  $i$ -го видеокadra, задается вектором  $\overline{OP_i}$ . Начало  $\overline{OP_i}$  совпадает с началом системы координат  $OUVW$ .

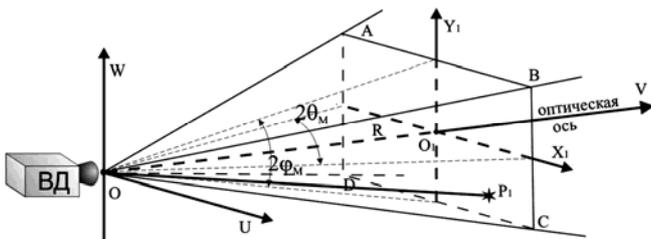


Рис. 4. Модель изображения, формируемого видеодатчиком

Найдем направление на объект  $\overline{OP_i}$  в системе координат  $O\xi\eta\zeta$  в момент формирования первого видеокadra. Рассмотрим систему координат модели изображения  $O_1X_1Y_1$ . Координаты точки  $P_1$  и вектора  $\overline{OP_i}$  в системе координат  $OUVW$  легко вычислить по координатам изображения точки  $P_1(NXP, NYP)$ , вычисляемым в результате обработки текущего видеокadra в системе координат изображения  $O_1X_1Y_1$  (рис. 2, б). В результате получим, что направление на анализируемую точку  $P$  на  $i$ -м кадре в системе координат  $OUVW$  описывается следующим вектором [2]

$$\overline{OP_i} = \begin{bmatrix} \frac{N_{XP}}{N_{XM}} \operatorname{tg} \theta_M & 1 \\ \frac{N_{YP}}{N_{YM}} \operatorname{tg} \phi_M & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Чтобы получить координаты вектора  $\overline{OP_i}$  в системе координат  $O\xi\eta\zeta$ , необходимо произвести преобразование координат с помощью матрицы направляющих косинусов  $T'(\theta, \phi, \psi)$ , переводящей координаты вектора из системы координат  $OUVW$  в  $OXYZ$ , и  $T(\alpha, \beta, \gamma)$ , переводящей координаты из  $OXYZ$  в  $O\xi\eta\zeta$  [8]. Матрица  $T(\theta, \phi, \psi)$  имеет вид

$$T(\theta, \phi, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

а  $T(\alpha, \beta, \gamma)$  может быть получена из матрицы  $T(\theta, \phi, \psi)$  заменой  $\theta$  на  $\alpha, \phi$  на  $\beta, \psi$  на  $\gamma$ . В результате координаты вектора  $\overline{OP_i}$  в системе координат  $O\xi\eta\zeta$  описываются следующим соотношением

$$\overline{p_i} = T(\alpha, \beta, \gamma) \cdot T(\theta, \phi, \psi) \cdot \overline{OP_i} \forall i, \quad (3)$$

Дальность до анализируемой точки  $P$  можно рассчитать на основании направлений  $\overline{p_i}$ , полученных из разных точек пространства за счет движения носителя. Таким образом, для вычисления дальности необходимо решить задачу триангуляции.

Рассмотрим движение носителя в трехмерном пространстве. Введем неподвижную систему координат  $O'\xi'\eta'\zeta'$ , оси которой сонаправлены с осями системы координат  $O\xi\eta\zeta$ , а плоскость  $O'\xi'\eta'$  совпадает с плоскостью земли и параллельна плоскости  $O\xi\eta$ . Началом системы координат  $O'\xi'\eta'\zeta'$  выберем проекцию точки  $O$  на плоскость земли в момент формирования первого видеокadra. На рис. 5 показано положение носителя (точки  $T_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), T_2(\xi_2, \eta_2, \zeta_2), T_3(\xi_3, \eta_3, \zeta_3)$ ) и направления на анализируемую точку пространства  $P(\xi, \eta, \zeta)$  в системе координат  $O'\xi'\eta'\zeta'$ . Точка  $T_1$  соответствует положению носителя в момент формирования первого видеокadra, точка  $T_2$  – в момент формирования второго видеокadra и т.д. Точки  $T'_1, T'_2, T'_3$  являются проекциями точек  $T_1, T_2, T_3$  на плоскость  $O'\xi'\eta'$ . Так как проекция точки  $T_1$  совпадает с началом системы координат  $O'\xi'\eta'\zeta'$ , то координаты точки  $T_1$  равны  $(0, 0, \zeta_1)$ ,  $\zeta_1$  – высота полета носителя в момент времени, соответствующий первому видеокadру. На рис. 5 точка  $P$  лежит в плоскости  $O'\xi'\eta'$ , поэтому она совпадает с проекцией  $P'$  на плоскость  $O'\xi'\eta'$  (это не влияет на ход рассуждений).

Процедуру вычисления дальности до анализируемой точки  $P$  рассмотрим в момент формирования третьего видеокadra (точка  $T_3$ ). Для решения поставленной задачи необходима информация о направлении на анализируемую точку в любые два момента времени. Для оценки дальности на текущем видеокadre целесообразно

выбрать направление, полученное в текущий момент времени  $\overline{p}_3$ , и направление, вычисленное на одном из предшествующих кадров, например,  $\overline{p}_2$ . В этом случае направления на анализируемую точку задаются соответственно прямыми  $T_3P$ ,  $T_2P$ . Так как в цифровых системах всегда присутствуют ошибки дискретизации, то прямые  $T_3P$ ,  $T_2P$ , полученные в результате обработки изображений и навигационной информации о движении носителя, скорее всего, не будут пересекаться, хоть и описывают направление на одну точку пространства. В этом случае точкой  $P$  можно считать такую точку пространства, к которой обе прямые сближаются наиболее близко. Найти подобную точку можно решив задачу минимизации критерия, описывающего сумму квадратов расстояний искомой точки  $P$  до прямых.

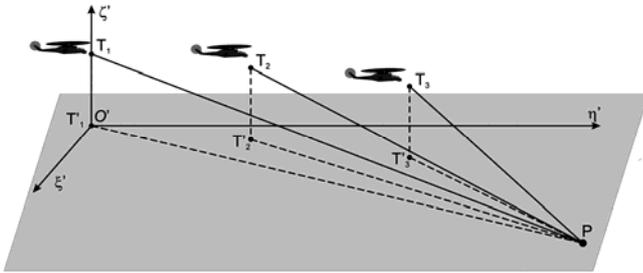


Рис. 5. Определение дальности

В данной статье предлагается другой способ. Сначала найдем на плоскости  $O'\xi'\eta'$  точку пересечения проекций прямых  $T_3P$ ,  $T_2P$ . Точкой пересечения проекций является точка  $P'$ . Решение может быть найдено, если проекции не параллельны. Параллельные проекции могут получиться из-за ошибок дискретизации при малых изменениях направления на объект в последовательности видеок кадров, при большой удаленности анализируемой точки  $P$  от ВД, при движении строго на точку  $P$ . В первых двух случаях для решения задачи поиска дальности до точки  $P$ , а также в некоторых случаях для повышения точности решения следует выбирать текущее направление на объект и направление, полученное несколько кадров назад (например, направление  $\overline{p}_1$ ). Чем больше времени прошло между обрабатываемой парой видеок кадров, тем меньше будет влияние ошибок дискретизации изображений. Это достигается за счет усреднения измеряемых угловых координат направлений на анализируемую точку. В третьем случае для оценки дальности до точки  $P$  следует использовать проекции направлений на вертикальную плоскость  $O'\eta'\zeta'$ .

Для отыскания координат точки  $P'$  составим векторные параметрические уравнения прямых  $T_3P$ ,  $T_1P$ . Прямая  $T_3P$  проходит через точку  $T_3(\xi_3, \eta_3, \zeta_3)$  и задается направляющим вектором  $\overline{p}_3(\xi_{P_3}, \eta_{P_3}, \zeta_{P_3})$ . Прямая  $T_1P$  проходит через точку  $T_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$  и задается вектором  $\overline{p}_1(\xi_{P_1}, \eta_{P_1}, \zeta_{P_1})$ . Тогда уравнения прямых  $T_3P$ ,  $T_1P$ , обозначим их соответственно  $l_3$ ,  $l_1$ , описываются следующими выражениями

$$l_3 = T_3 + t_3 \overline{p}_3; \quad l_1 = T_1 + t_1 \overline{p}_1, \quad (4)$$

где  $t_1$ ,  $t_3$  – параметры прямых. Для нахождения координат

точки  $P'$  следует составить систему уравнений, приравняв уравнения прямых  $l_1$ ,  $l_3$  по координатам  $\xi$  и  $\eta$ . В результате получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными  $t_1$ ,  $t_3$ .

$$\begin{cases} \xi_1 + t_1 \xi_{P_1} = \xi_3 + t_3 \xi_{P_3}; \\ \eta_1 + t_1 \eta_{P_1} = \eta_3 + t_3 \eta_{P_3}. \end{cases} \quad (5)$$

В силу не параллельности направлений на анализируемую точку существует единственное решение  $t'_1$ ,  $t'_3$  системы (5). Получив решение (5) координаты точки  $P(\xi\eta\zeta)$  можно найти по выражению

$$P = T_3 + t'_3 \overline{p}_3 \quad \text{или} \quad P = T_1 + t'_1 \overline{p}_1, \quad (6)$$

По координатам точки  $P$  легко вычислить дальность  $D_P$  до анализируемой точки по следующему выражению

$$D_P = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}. \quad (7)$$

Координата  $\zeta$  точки  $P$  позволяет судить о высоте той части объекта, которой принадлежит анализируемая точка. Таким образом, проанализировав в последовательности видеок кадров направления на все точки пространства, попадающие в поле зрения ВД, можно судить о наличии высотных объектов. Высотой объекта считается значение высоты точки, принадлежащей объекту и имеющей наибольшую координату  $\zeta$  среди всех точек объекта. Для решения задачи сопоставления точек с объектами следует воспользоваться методами кластерного анализа [9]. Точки с ненулевой высотой следует группировать на основании пространственных координат. Точки с нулевой высотой принадлежат лежащим на поверхности земли объектам.

### Пример работы алгоритма обнаружения наземных препятствий

Для иллюстрации работы алгоритма рассмотрим случай когда летательный аппарат совершает полет на малой высоте с постоянной скоростью по прямой траектории. Будем считать известными в моменты формирования видеок кадров координаты и скорость носителя, а также углы поворота рамок кардана. Для простоты описания положим в данном примере, что углы поворота кардана постоянны и равны нулю. Пусть перед летательным аппаратом имеются препятствия в виде трех высотных зданий. На рис. 6, а показан один из видеок кадров обрабатываемой тестовой видеопоследовательности. На рис. 6, б показаны ключевые точки, выделенные на изображении с помощью детектора особых точек (детектора Харриса). На рис. 6, в изображено перемещение ключевых точек между первым и вторым анализируемыми видеок кадрами. На рис. 6, г показаны результаты обнаружения высотных препятствий и ключевые точки изображения, для которых оценка высоты больше нуля.

### Заключение

Описанный алгоритм вычисляет дальность до препятствий и их высоту над поверхностью земли путем обработки последовательности видеок кадров, сформированных одним видеодатчиком. Для применения рассмотренного алгоритма требуется постоянное поступательное движение видеодатчика. Результатом работы

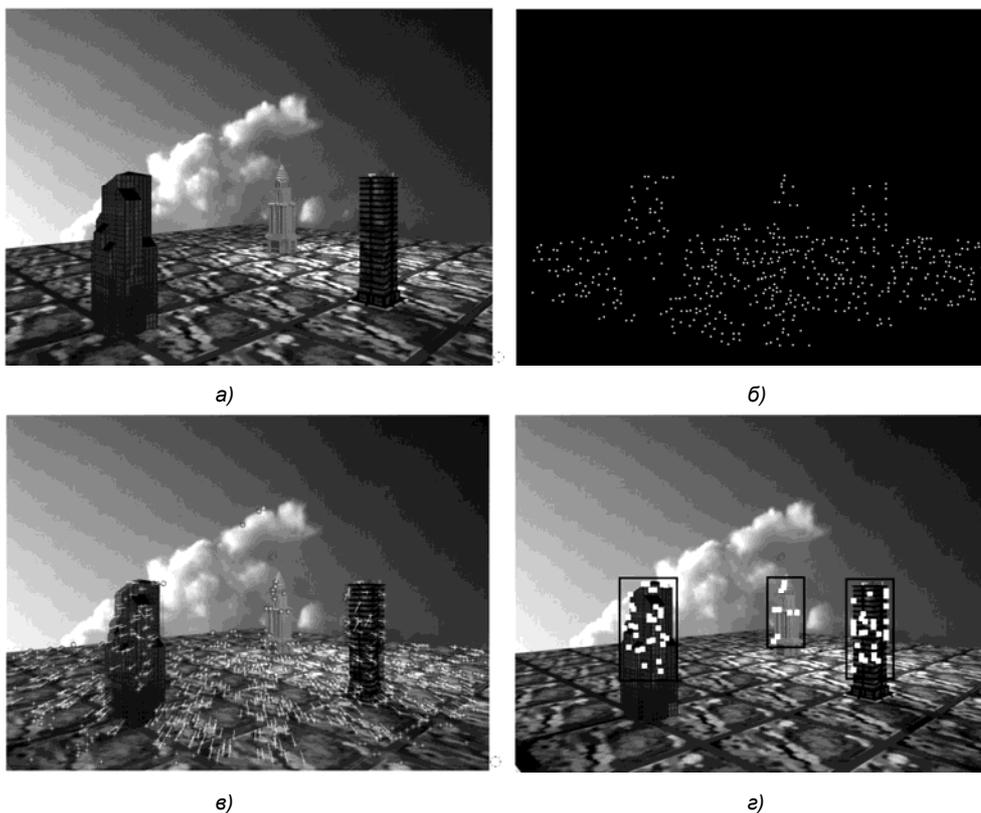


Рис. 6. Этапы алгоритма обнаружения препятствий

алгоритма является информация о направлении на объект, дальность до точек объекта, пространственные координаты препятствия.

Точность оценки параметров высотных объектов зависит от скорости носителя, дальности до препятствий, их расположения на изображении относительно центра изображения. Данные параметры определяют скорость изменения угловых координат точек объекта при движении носителя. Для повышения точности оценки координат точек объекта следует выбирать более длинную предысторию видеокadres. Также на точность вычисления координат ключевых точек сильное влияние оказывают ошибки дискретизации изображений, датчиков углов поворота рамок кардана, датчиков высоты и ориентации носителя, а также ошибки сопоставления ключевых точек на анализируемых видеокadres. Анализ точности измерения координат точек объекта показывает, что высотные сооружения в виде зданий могут быть обнаружены на расстоянии до 1 км.

Исследования выполнены при финансовом содействии гранта Президента РФ МК-433.2014.10.

### Литература

1. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и соп-

вождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.: ил.

3. Балашов О.Е., Степашкин А.И. Нашлемная система обзора и целеуказания // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 4 (38). - Рязань, 2011. – С. 40-44.

4. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Прогнозирование угловых координат движущихся объектов в бортовых оптико-механических системах // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 2 – 7

5. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И., Трофимов Д.В. Алгоритм измерения угловых координат линии визирования оператора // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 18–21.

6. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И., Трофимов Д.В. Алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора в нашлемной системе позиционирования // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6 (61). С. 7-11.

7. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Некоторые вопросы построения видеокomпьютерных следящих систем // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: Сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2003. С. 16–25.

8. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение, 1968. 351 с.

9. Калинина В. Н., Соловьев В. И. Введение в многомерный статистический анализ: Учебное пособие / ГУУ – М., 2003. – 66 с.