

УДК 621.035

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю. В. Копылов, Б. Б. Михайлов

Центр робототехники при МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматриваются система технического зрения и ее алгоритмическое обеспечение, предназначенное для обнаружения подвижных объектов на сложном фоне или в условиях плохой видимости. Представлены блок-схемы алгоритмов, а также примеры обработки изображений.

Определение момента появления объекта в рабочем пространстве робота и последующее измерение его координат — одна из основных задач, которая решается с помощью информационно-измерительных систем. В реальных условиях для этой цели обычно используют радиолокационные, лазерные и визуальные системы. Каждая из них имеет свои положительные и отрицательные стороны: наличие излучения, необходимость дополнительной подсветки, работа в условиях плохой видимости и т. д.

Ниже рассматриваются система технического зрения (СТЗ) и ее алгоритмическое обеспечение, предназначенное для обнаружения подвижных объектов на сложном фоне. Эта задача отличается от обычных систем наблюдения, работающих в режиме реального времени (например, охранных систем) тем, что способна работать на открытом воздухе в недетерминированной среде. В отличие от других разработок в этой области, как например [1], все описанные алгоритмы работают не в частотной, а в пространственной области изображения, что значительно дешевле, так как позволяет реализовать данную систему с помощью обычного персонального компьютера без использования специализированных устройств.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К задачам, связанным с обработкой подвижных объектов, предъявляются очень жесткие требования по времени, особенно, если объекты движутся с большими скоростями. Задача усложняется по времени, еще сильнее, если объекты не определены или трудно различимы. Из-за низкой скорости выполнения большинство стандартных методов обработки изображений являются непригодными, поэтому большое значение уделяется процедуре предварительной обработки изображения.

Суть рассматриваемой в данной статье задачи состоит в том, что с помощью неподвижной камеры ведется наблюдение за некоторым участком местности,

изображения которого непрерывно поступают в компьютер через определенные промежутки времени. Изображение соответствующим образом обрабатывается, и при попадании в поле зрения камеры подвижного объекта сигнал о его обнаружении вместе с вычисленными параметрами объекта передается на вышестоящее устройство управления системой. Если с устройства управления приходит подтверждение на захват объекта, СТЗ начинает с некоторой периодичностью передавать ему координаты текущего местонахождения объекта; кроме того, при необходимости, возможно проведение дополнительного анализа найденного объекта (например, распознавание).

Следует заметить, что работа происходит в реальных недетерминированных условиях: Отсюда возникает задача обработки сложного фона, когда освещенность является нестабильной из-за изменения погодных условий, а также времени суток. Кроме того, имеется большое число помех, обусловленное наличием на сцене других подвижных "необъектов" (качающиеся деревья, трава, плывущие по небу облака и т. д.). Все это значительно затрудняет обработку изображения, поскольку сами объекты полностью неизвестны, а некоторые из них могут быть даже закамуфлированы под окружающую среду или видны лишь частично.

На рис. 1 представлена блок-схема работы СТЗ. Изображение с телекамеры через устройство сопряжения поступает в вычислительный блок в формате 320x200 пикселей, или элементов изображения. Каждый пиксель имеет 64 градации яркости. В качестве устройства сопряжения использовалась специальная плата видеоввода, работающая в режиме прямого доступа к памяти (ПДП), что обеспечивает ввод изображения в темпе реального времени. В качестве вычислительного блока используется персональный компьютер на базе процессора Intel 486 DX2-66. Численные результаты, полученные после обработки (координаты, скорость, другие параметры объекта), выдаются вышестоящей системе управления комплексом, и одновременно изображение поступает на монитор оператора для контроля работы системы.

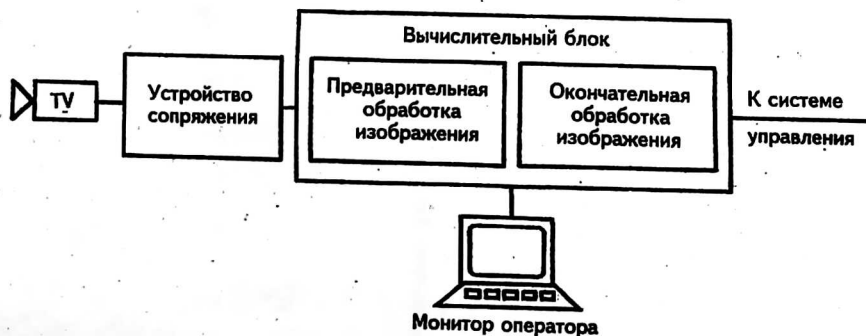


Рис. 1. Блок-схема работы СТЗ

Перед началом работы выполняются инициализация всех необходимых переменных, а также настройка платы видеоввода на текущую освещенность рабочей сцены. Дальнейшая обработка видеoinформации подразделяется на две стадии: предварительной и окончательной обработки.

Предварительная обработка улучшает качество изображения. В ее задачу входят фильтрация помех и выделение объекта. В случае успешного решения этой задачи значительно упрощается окончательная обработка изображения, что приводит к увеличению быстродействия всей системы в целом. Наличие большого числа помех на изображении может привести к сбою в процессе работы. Поэто-

му основное внимание авторами было уделено именно исследованию процедуры предварительной обработки (фильтрации) изображения [3].

На этапе окончательной обработки проводится собственно обнаружение объекта, вычисление его координат, скорости и пр., а также статистический анализ информации о движении объекта для фильтрации помех, оставшихся после этапа предварительной обработки изображения.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ

Перед началом работы СТЗ, а также периодически во время ее работы необходимо производить настройку на текущую освещенность рабочей сцены, что обеспечивает нормальные условия функционирования системы. Это особенно важно для рассматриваемой системы, где обработка изображения должна занимать минимальное время. Автоматическая настройка позволяет уменьшить число помех на входе СТЗ, а следовательно, и время обработки изображений.

Плата видеоввода, посредством которой осуществляется ввод изображения в память компьютера, обладает возможностью регулировки яркости вводимого изображения. Для этого имеются два программно-доступных параметра. Первый из них (LEVEL) регулирует уровень вводимого видеосигнала, а второй (GAIN) отвечает за его размах. Иными словами, первый параметр регулирует яркость, а второй — контрастность изображения.

Для оценки параметров вводимого видеосигнала строилась гистограмма распределения яркости полученного изображения [3]. Экспериментальным путем было установлено, что наиболее устойчивое обнаружение объектов системой наблюдается, когда среднее значение гистограммы находится в середине, а ее ширина у основания составляет около $1/2$ от всего диапазона яркости изображения. Каждый элемент изображения квантуется на 64 градации по яркости. Следовательно, среднее значение гистограммы $X_{\text{ср}}$ должно быть равно 32. При аппроксимации гистограммы нормальным законом распределения имеем $3\sigma = 64/2 = 32$ (ширина у основания), отсюда $\sigma = 10$, а дисперсия $\sigma^2 = 100$.

Автоматическая настройка СТЗ выполнялась путем последовательного считывания изображения с телекамеры с одновременным вычислением параметров гистограммы. В зависимости от их численных значений соответствующим образом изменяются значения регистров платы видеоввода. Вначале достигается необходимая ширина гистограммы путем регулировки параметра GAIN. После того как отклонение дисперсии от оптимального значения не превышает 10 %, мы начинаем коррекцию среднего значения гистограммы. Это достигается путем регулировки параметра LEVEL с одновременной проверкой дисперсии гистограммы, так как возможно ее отклонение в силу изменения внешних условий ($\sigma_{\text{опт}}^2 = 100 \pm 10$). С помощью параметра LEVEL можно очень точно корректировать среднее значение гистограммы, поэтому его регулировка продолжается до тех пор, пока $X_{\text{ср}}$ не достигает оптимального значения ($X_{\text{опт}} = 32$).

После того как все параметры гистограммы совпали с оптимальными значениями, процедура настройки завершает свою работу и передает управление основной части программы.

Время работы процедуры настройки составляет не более 5 с на ПЭВМ Intel 486 DX2-66. При этом количество считываемых кадров не превышает 30. Это позволяет производить подстройку не только в процессе инициализации системы, но и во время работы основной части программы, адаптируя тем самым систему обнаружения к внезапным изменениям параметров внешней среды.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Схема алгоритма предварительной обработки изображений представлена на рис. 2. В память компьютера вводятся два кадра, снятых телекамерой с опреде-

ленной задержкой. Далее производится предварительная фильтрация каждого кадра. В ходе исследований установлено, что наиболее подходящим для этой цели является линейный фильтр [3], так как он сглаживает изображение, удаляя тем самым высокочастотные помехи.

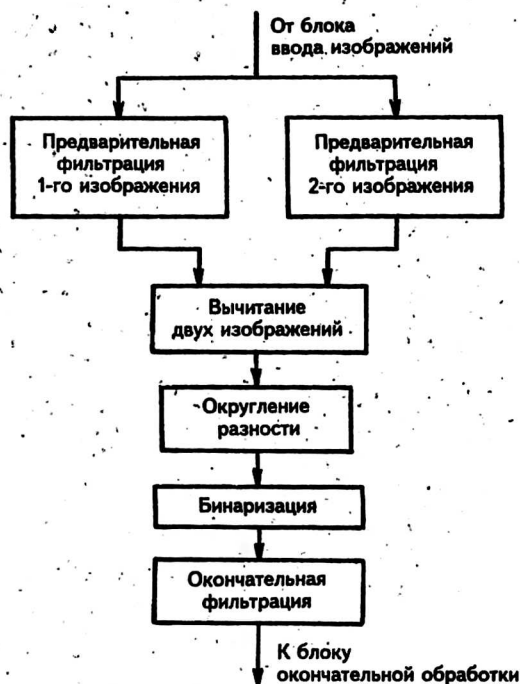


Рис. 2. Схема алгоритма предварительной обработки изображения.

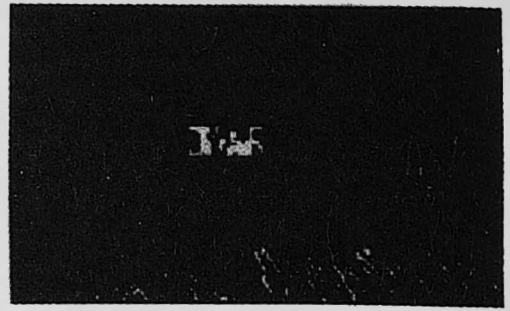
После предварительной фильтрации первый кадр вычитается из второго. В результате мы получаем след от движения искомого объекта, а также ряд помех, связанных с нестационарностью фона. Полученная разность округляется, а затем бинаризуется. Округление изображения производится с учетом того, чтобы результат вычитания не зависел от изменения общей яркости фона. Экспериментально установлено, что этому условию максимально соответствует округление изображения до двух старших разрядов. В этом случае даже при резком изменении освещенности фон остается равен нулю, в то время как изображение следа объекта практически не изменяется.

Далее производится окончательная фильтрация изображения, которая фильтрует помехи, вызванные нестационарностью фона. На рис. 3 представлены результаты предварительной обработки изображения реального объекта, который представляет собой темный пятнистый прямоугольник на фоне леса. Как видно из рисунка, лес, находящийся вдалеке от объекта, почти не мешает обработке. Основным источником помех в этом случае является высокая трава в правом углу экрана, находящаяся непосредственно перед объективом камеры.

Для устойчивого обнаружения объекта необходимо полностью уничтожить помехи, вносимые внешней средой, или хотя бы существенно уменьшить их количество. Но в общем случае, когда заранее неизвестны ни форма, ни размеры объекта, ни помеховая обстановка, в которой предстоит работать, единого оптимального фильтра не существует. Другими словами, для каждого типа изображений существует свой собственный оптимальный фильтр.



а



б



в

Рис. 3. Пример обработки реального объекта:

- а — исходное изображение на входе телекамеры;
- б — результат вычитания двух последовательно введенных кадров;
- в — результат окружения, бинаризации и окончательной фильтрации изображения

Авторами было проведено широкое исследование ряда существующих алгоритмов фильтрации. Цель данного исследования — получить зависимость качества фильтрации от используемого фильтра (или набора фильтров). Для анализа результатов фильтрации разработали специальную методику [2], которая позволяет подобрать необходимый для данной задачи фильтр, основываясь не на субъективных впечатлениях разработчика, а на жестко выбранном критерии анализа результатов работы фильтра. Результаты работы процедуры фильтрации определенным образом описываются и делаются соответствующие выводы: пригодна ли данная процедура для обработки таких типов изображений или нет. Если несколько процедур являются пригодными, результаты их работы сравниваются между собой и выбирается наилучшая из них. Это может делаться как автоматически, так и вручную.

Программа, реализующая описанную методику, имеет ряд встроенных процедур, реализующих самые распространенные методы фильтрации изображений [3, 4] (линейный фильтр, медианный фильтр, сжатие и расширение изображения и пр.), а также большое число шаблонов различных форм и размеров (квадратные, крестообразные, диагональные). Помимо этого, существует возможность подключения внешних процедур фильтрации, не имеющих в библиотеке программы. Это позволяет оценивать даже специально разработанные под решаемую задачу процедуры фильтрации. В качестве параметров описания результатов работы фильтра можно задавать общую площадь всех объектов на изображении, количество отдельных объектов; каждого объекта можно вычислить его площадь, координаты центра масс, коэффициент формы; возможно получение распределения площадей объектов, их местонахождения на изображении.

Как отмечалось выше, большинство сложных методов обработки изображений были неприменимы из-за времени работы программы. Поэтому основной упор был сделан на использование фильтров, не требующих больших временных за-

трат. Таким образом, в качестве критериев были выбраны: условие устойчивого обнаружения объекта, низкий уровень шума и время работы фильтра. Набор статистических данных результатов фильтрации осуществлялся по шести типам изображений, причем для каждого типа проводилось по несколько экспериментов, и их результаты усреднялись.

Изображение на выходе фильтра представляло собой набор отдельных пятен разных формы и размеров (см. рис. 3). След от движения объекта, как правило, состоял из одного или нескольких крупных пятен, в то время как помехи представляли собой пятна меньшего размера. Поэтому в качестве приемлемого результата фильтрации авторами считалось наличие на полученном изображении одного или нескольких пятен определенной площади, которая должна превышать некоторую заданную величину. В этом случае с большой долей уверенности можно утверждать, что оставшееся пятно (или несколько пятен) на изображении представляет собой след искомого объекта (или объектов).

Реально, после фильтрации подсчитывалось общее количество объектов на изображении, количество мелких (площадью менее 10 пикселей) и количество крупных (площадью более 50 пикселей) объектов, вычислялось также время работы данного фильтра в условных единицах (у. е.). Одна условная единица составляет порядка 120—150 мс на ПЭВМ Intel 486 DX2-66, или 50—70 мс на ПЭВМ Pentium-90.

Результаты исследований были представлены в виде гистограмм (по одной гистограмме на каждый фильтр), причем после каждой группы фильтров одного типа приводилась их сравнительная характеристика. В качестве параметра сравнения было выбрано общее количество объектов, оставшихся на изображении после фильтрации. Так, на рис. 4 приведены гистограммы, отображающие результаты исследований рекуррентного медианного фильтра с апертурами, соответственно, 3x3, 5x5, 7x7, а также их сравнительная характеристика.

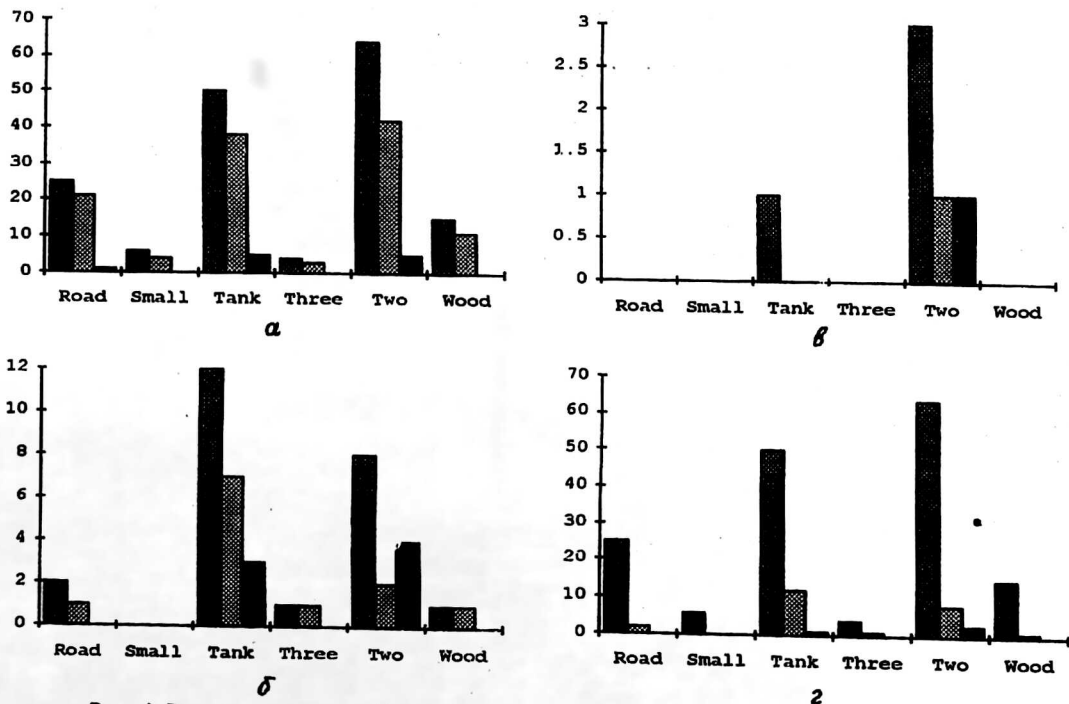


Рис. 4. Результаты исследований рекуррентного медианного фильтра размерами:
 а — 3x3 (время работы 2 у. е.);
 б — 5x5 (время работы 5 у. е.);
 в — 7x7 (время работы 20 у. е.);
 г — сравнительная характеристика

Каждая гистограмма представляет собой результаты нескольких измерений, по три параметра в каждом. Первый параметр — общее количество пятен на изображении, второй — количество мелких и третий — количество крупных пятен на изображении. В сравнительной характеристике эти параметры представляют собой общее количество пятен для апертуры 3x3, 5x5 и 7x7, соответственно.

Из рисунка видно, что изображения типов Small, Three, Wood можно с успехом обрабатывать апертурой 3x3. Изображения типа Road следует обрабатывать апертурой 5x5, а к таким типам изображений, как Tank и Two, после фильтрации необходимо применить также процедуру сжатия, так как количество помех при использовании апертуры 5x5 все еще очень велико. Апертура размерности 7x7 могла бы быть в последнем случае весьма эффективна, но, к сожалению, фильтр с такой апертурой является неприемлемым из-за длительного времени выполнения (20 у.е.). Для его использования необходима либо его аппаратная реализация, либо общее увеличение мощности вычислительной системы.

В результате применения методики были выбраны два возможных варианта окончательного фильтра:

рекуррентный медианный фильтр, который обеспечивает наиболее качественную фильтрацию и эффективен при сравнительно небольшом количестве помех (до 35 % от всей площади изображения); размер апертуры используемого фильтра — параметр, который изменяется в зависимости от степени зашумленности изображения и размера помех;

8-связное сжатие изображения — более быстродействующий вариант по сравнению с предыдущим фильтром и эффективен при очень высокой степени зашумленности изображения; количество каскадов сжатия является параметром, зависящим от степени зашумленности изображения и размера помех.

В результате была реализована процедура адаптивной фильтрации, обеспечивающая изменение типа фильтра в зависимости от качества входного изображения.

ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Полностью удалить все помехи на этапе предварительной обработки оказалось невозможно, поэтому на заключительном этапе была введена статистическая обработка параметров подвижного объекта. На основании результатов этой обработки принималось решение о наличии подвижного объекта на исходном изображении. Алгоритм работы процедуры окончательной обработки изображения представлен на рис. 5.

Прежде всего определяются площадь, координаты, значения скорости (под скоростью здесь и далее будем понимать величину смещения центра масс объекта (в пикселях) за некоторое фиксированное время, равное одному такту работы системы) и направление движения предполагаемого объекта. Если значение площади оказывается меньше заранее заданного или вычисленного на предыдущих циклах значений, то считается, что объекта на изображении нет.

Координаты объекта вычисляются на основе массива данных, полученных после предварительной обработки по формулам:

$$X_{об} = \sum_i f[i, j] \cdot i / \sum_j \sum_i f[i, j];$$

$$Y_{об} = \sum_i f[i, j] \cdot j / \sum_j \sum_i f[i, j];$$

где $f[i, j]$ — элемент массива бинаризованного изображения;
 i и j — координаты элемента массива.

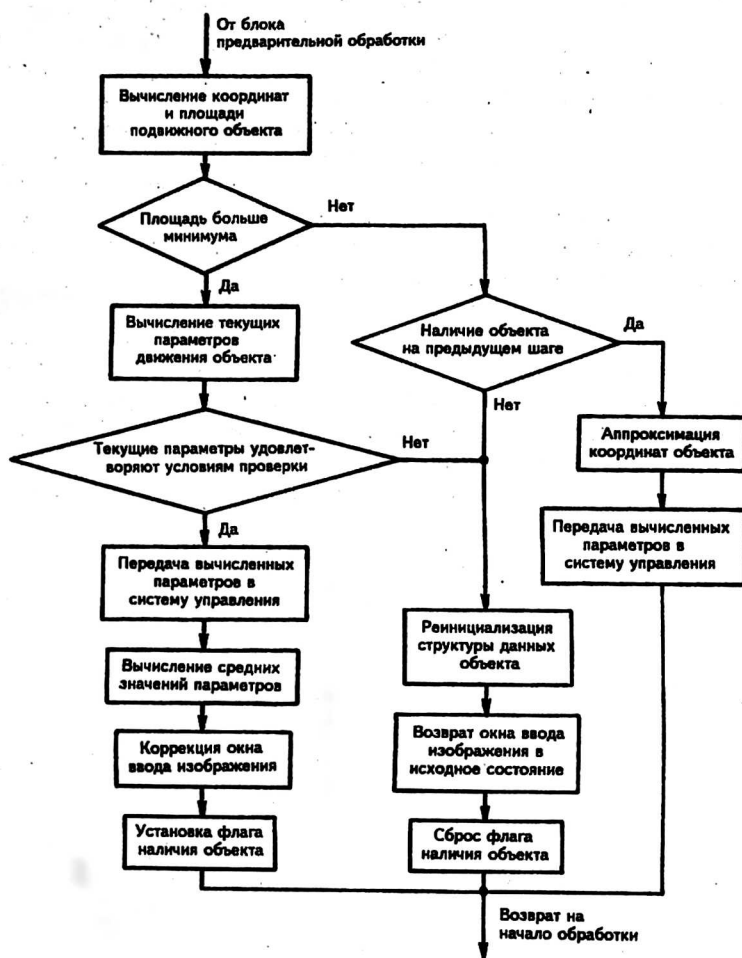


Рис. 5. Схема алгоритма окончательной обработки изображения

Текущая скорость подвижного объекта вычисляется на основании двух последующих измерений координат по формулам (безразмерные переменные):

$$V_x = |X_{06} - X_1|; \quad V_y = |Y_{06} - Y_1|;$$

$$S_x = \text{sign}(X_{06} - X_1); \quad S_y = \text{sign}(Y_{06} - Y_1),$$

где X_{06} и Y_{06} — текущие координаты объекта;

X_1 и Y_1 — предыдущие координаты объекта;

V_x и V_y — текущие скорости движения объекта;

S_x и S_y — текущие направления движения объекта (знак).

Движение реального объекта является детерминированным. Если результаты измерений координат объекта имеют хаотический характер, то это — колебания помехи (или помех). Хаотичность выражается в резком изменении направления движения и значительном разбросе скорости движения на двух последовательных циклах обработки. После накопления данных выполняется анализ направления движения вероятного объекта. Анализ проводится из предположения, что подвижный объект из-за своей инертности не может мгновенно остановиться или

изменить направление движения. Таким образом, если на соседних циклах работы программы направления движения предполагаемого объекта не совпадают, то принимается решение, что эта помеха. Если объект "проходит" проверку направления движения, вычисляются распределения скоростей движения отдельно по каждой координате и рассчитываются такие параметры этих распределений, как среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Далее проводится сравнение текущих скоростей объекта с вычисленными параметрами распределений. Анализ движения реальных объектов показал, что их скорость не может отличаться от средней более чем на 50 %. При выполнении этого условия принимается решение о наличии объекта на изображении.

Используемая плата видеоввода позволяет записывать в память компьютера не только полный растр, но и его фрагмент (окно). Параметры этого окна (координаты верхнего левого угла и размеры) заносятся в регистры платы и могут модифицироваться в процессе работы программы. В процессе инициализации системы устанавливаются размеры окна 320x200 элементов. После обнаружения объекта рассчитываются параметры нового окна ввода изображения исходя из текущих координат, скорости и направлений движения объекта по формулам:

$$\begin{aligned} X_0 &= X_{об} + (1 - 2 \cdot S_x) \bar{V}_x; \\ Y_0 &= Y_{об} + (1 - 2 \cdot S_y) \bar{V}_y; \\ X_{\text{pict}} &= 3 \bar{V}_x; \\ Y_{\text{pict}} &= 3 \bar{V}_y, \end{aligned}$$

здесь X_0 , Y_0 , X_{pict} , Y_{pict} — координаты верхнего левого угла и размеры нового окна;

\bar{V}_x , \bar{V}_y — средние скорости движения объекта.

В результате уменьшается вводимая область изображения, существенно сокращается размер массива данных, а следовательно, уменьшается и время предварительной обработки. Кроме того, значительно уменьшается число возможных помех на исходном изображении, что позволяет изменить процедуру окончательной фильтрации путем подстройки вышеописанных параметров (уменьшение размерности апертуры медианного фильтра или каскадов сжатия) и увеличить скорость вычисления координат объекта.

Для того чтобы слежение не прерывалось при кратковременной потере объекта (объект может слиться с фоном или заехать за деревья и т. д.), анализируется среднеквадратичное отклонение скорости по каждой координате. Если величина отклонения не превышает 10 %, выполняется аппроксимация координат объекта на основе параметров, вычисленных на предыдущих циклах. Эта процедура выполняется в течение двух циклов, и если объект не обнаруживается, то все данные о нем сбрасываются, и окно ввода возвращается в исходное состояние. Описанная процедура приводит к повышению надежности обнаружения и слежения за объектами.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы над данной задачей были разработаны алгоритмы определения координат подвижного объекта. На основе этих алгоритмов создано программное обеспечение, написанное на языке Ассемблер для операционной системы MS-DOS версии 3.3 и выше. Данные алгоритмы испытывали на лабораторных и реальных объектах. Испытания показали их работоспособность, что позволяло устойчиво обнаруживать и следить за подвижным объектом, размер

которого на мониторе оператора составляет не менее 5×5 элементов изображения, а скорость не превышает 70 км/ч на расстоянии 500 м от объектива телекамеры. Частота измерения параметров движения объекта на ПЭВМ Intel 486 DX2-66 составляет 2 Гц при первичном поиске объекта и 5 Гц — при слежении за объектом.

В заключение отметим, что разработанное устройство является системой открытого типа, т. е. предполагает возможность доработки и замены одних программных модулей на другие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lamproulos G. A., Boulter G. F. Filtering fo moving targets using SBIR sequential frames// IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995. P. 1255—1268.
2. Копылов Ю. В. Предварительная обработка изображений в условиях сложной помеховой обстановки. — М.: Тр. конф.-школы "Технические средства изучения и освоения океанов и морей. Состояние и перспективы". — М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 1996. С. 27.
3. Фу К., Гонсалес Р., Ли К.. Робототехника. — М.: Мир, 1989. — 621 с.
4. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений/Под ред. Т. С. Хуанга. — М.: Радио и связь, 1984. — 224 с.

ALGORITHMIC SUPPORT FOR A MOVING OBJECTS DETECTING SYSTEM

Y. V. Kopylov, B. B. Mihaylov

Bauman MSTU Robototechnic Centre, Moscow, Russia

This article is about robot vision system and its algorithmic support for moving objects detected on a complex background or in bad vision conditions. Algorithm schemes and sample processing results are submitted.