

УДК 004.932

СРАВНЕНИЕ ТРЕХ КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МНОГОЭТАЛОННОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ

Корепанов С.Е., ведущий инженер каф. Автоматики и информационных технологий в управлении (АИТУ)

Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: aitu@rsreu.ru;

Смирнов С.А., к.т.н., доцент каф. АИТУ РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru;

Стротов В.В., к.т.н., доцент каф. АИТУ РГРТУ, e-mail: aitu@rsreu.ru.

THE COMPARISON OF THREE PERFORMANCE INDICATORS FOR THE OBJECT POSITION ESTIMATION ALGORITHM

Korepanov S.E., Smirnov S.A., Strotov V.V.

In this work three performance indicators for the object coordinate estimation algorithm based on multiple template matching are considered. They include: criterion based on temporal reference area image variability, criterion based on criteria function shape analysis in the nearest neighborhood of its extremum and the criterion based on image gradient analysis. The results of the comparative experimental examinations are given. The natural video is used for the experimental examination.

Key words: the object coordinate estimation algorithm, multiple template matching, SAD criterion, vision systems, performance indicators.

Ключевые слова: многоэталонный алгоритм оценки координат объектов, разностная критериальная функция, системы обработки изображений, критерии работоспособности.

Введение

В настоящее время системы обработки изображений получили широкое распространение. Они успешно используются при решении задач наземной и воздушной навигации, при разработке мобильных роботов, в охранных системах видеонаблюдения, в сфере специальных и военных технологий.

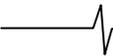
Системы обработки изображений могут быть установлены как на стационарную платформу, так и на борт мобильного носителя. В таких системах могут использоваться датчики, регистрирующие изображения в различных спектральных диапазонах. Наибольшее распространение получили видеодатчики, формирующие изображения в видимом и инфракрасном диапазонах.

Основным классом задач, решаемых в таких системах, является обнаружение и измерение координат объектов интереса. Зачастую, при работе системы обработки изображений необходимо оценить координаты объектов от момента, когда размеры объекта близки к точечным и до момента, когда объект заслоняет поле зрения видеодатчика. Подобное изменение размеров объекта проявляется в случае приближения или удаления друг от друга объекта наблюдения и видеодатчика. Для получения координат в таких условиях необходимо использовать алгоритм, ориентированный на адаптацию к изменению размеров объекта. К сожалению, на сегодняшний момент среди существующих алгоритмов нет такого, который обладал бы удовлетворительным качеством в таких условиях наблюдения. Добиться приемлемого качества оценки координат объекта можно за счет использования комплексного подхода, заключаю-

Рассмотрены три критерия работоспособности многоэталонного алгоритма оценки координат объектов: критерий на основе анализа временной изменчивости опорного участка, критерий на основе анализа поведения разностной критериальной функции в окрестности минимума и критерий на основе анализа градиентного изображения. Представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований, выполненные с использованием натуральных видеосюжетов.

щегося в переключении между алгоритмами, каждый из которых будет ориентирован на определенный этап слежения за объектом. В работе [1] осуществляется переключение между *алгоритмом на основе пространственно-временной фильтрации*, ориентированным на оценку координат объектов малых и средних размеров, и *многоэталонным алгоритмом*, предназначенным для оценки координат объектов больших размеров. В работе предлагается осуществлять переключение между алгоритмами, исходя из текущих размеров наблюдаемого объекта. Однако, при использовании такого принципа переключения возможны ситуации, когда многоэталонный алгоритм на начальных кадрах будет выдавать координаты объекта с повышенной ошибкой. Этот факт объясняется тем, что на наблюдаемом изображении нет необходимого количества опорных участков с достаточным контрастом. В качестве альтернативного принципа переключения между алгоритмами можно рассматривать переключение на основании критериев работоспособности [2]. В таком случае, эффективность комплексного подхода в значительной степени будет зависеть от правильности выбора критерия работоспособности.

В данной работе проведено сравнение трёх критериев работоспособности: *критерия на основе анализа временной изменчивости опорного участка, критерия на основе анализа поведения разностной критериальной функции в окрестности минимума и критерия на*



основе анализа градиентного изображения. Сравнение будет производиться с точки зрения ошибок принятия решений и сложности вычислительной реализации. Перед тем как привести подробное описание критериев работоспособности, приведем описание многоэталонного алгоритма оценки координат.

Многоэталонный алгоритм оценки координат объектов

Для измерения координат крупноразмерных объектов в работе [1] используется многоэталонный алгоритм. В основе алгоритма лежит принцип, построенный на выборе нескольких опорных участков на изображении и определении их положения от кадра к кадру. Для слежения за опорными участками используется алгоритм оценки положения на основе сопоставления с эталоном. Будем называть его разностным алгоритмом, т.к. критериальная функция представляет собой модуль разности эталонного и наблюдаемого изображений [3]. Многоэталонный алгоритм состоит из следующих этапов.

1. В начальный момент времени на изображении объекта выбирается заданное число участков s_k , называемых опорными. Количество опорных участков и их размер определяются исходя из возможностей аппаратной платформы, на которой реализуется рассматриваемый алгоритм.

2. По положению опорных участков на наблюдаемом изображении оценивается местоположение объекта. Координаты центров опорных участков определяются с субпиксельной точностью разностным алгоритмом.

3. На основании полученных оценок местоположения опорных участков находятся оценки параметров геометрических преобразований сдвига, поворота и изменения масштаба наблюдаемого изображения объекта.

4. Определяются новые координаты центра изображения наблюдаемого объекта и его размеры с учетом полученных параметров геометрических преобразований.

5. Непригодные к дальнейшему использованию опорные участки заменяются на новые участки.

Особенность данного алгоритма заключается в том, что опорные участки могут быть выбраны только на изображении объекта. Поэтому для выбора участков используется априорная информация об объекте и фоне изображения. Если объект наблюдается на слабоконтрастном или однородном фоне, то выбор опорных участков может производиться по центральной зоне наблюдаемого изображения по критерию:

$$(\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k) = \operatorname{argmin}_{\alpha, \beta} \left(\frac{1}{\sum_{(i,j) \in S_k} (\Delta_i I(i, j, n))^2} + \frac{1}{\sum_{(i,j) \in S_k} (\Delta_j I(i, j, n))^2} \right), \quad (1)$$

где запись вида $\Delta_i I$ означает операцию численного дифференцирования изображения I по координате i , а S_k – множество точек k -го участка S_k , расположенного в точке с координатами (α, β) [4].

Критерии работоспособности

Перейдем к разработке критериев работоспособно-

сти многоэталонного алгоритма. Поскольку для корректной работы данного алгоритма требуется определенное минимальное количество опорных участков, изменения положений которых на кадрах видеопоследовательности вычисляются разностным алгоритмом, то критерий работоспособности многоэталонного алгоритма сводится к проверке критериев работоспособности разностного алгоритма на выбранных опорных участках. Если количество опорных участков, на которых разностный алгоритм работоспособен, не меньше минимального количества опорных участков, достаточных для работы многоэталонного алгоритма, то многоэталонный алгоритм работоспособен, в противном случае – нет.

Критерии работоспособности должны служить индикатором качества оценки координат и при этом не опираться на эталонные данные о местоположении опорных участков. Сущность критерия работоспособности должна быть связана с особенностями многоэталонного алгоритма оценки координат объектов, а именно в способе выбора опорных участков и в сопоставлении опорных участков на основе анализа разностной критериальной функции. Для принятия решения о работоспособности необходимо сравнить полученное значение критерия с пороговым значением, полученным экспериментальным путем по методике подробно описанной в [5].

Критерий работоспособности №1. Данный критерий основывается на анализе временной изменчивости опорного участка. Пусть имеется дискретное эталонное изображение опорного участка H , представляющее собой множество связанных элементов $h(i, j)$. Данное эталонное изображение является частью наблюдаемого изображения $l(i, j)$, $(i, j) \in L$. Поиск эталонного изображения H на наблюдаемом в n -м кадре изображении L заключается в минимизации разностной критериальной функции вида:

$$F(\alpha, \beta, n) = \sum_{(i,j) \in H} |l(i + \alpha, j + \beta, n) - h(i, j)|, \quad (2)$$

где $l(i, j, n)$ – наблюдаемое в n -м кадре изображение, α, β – параметры, характеризующие смещение объекта вдоль осей координат.

При наблюдении за опорным участком его изображение будет изменяться от кадра к кадру. Изменчивость опорного участка во времени можно охарактеризовать минимальным значением критериальной функции, получаемой в очередном кадре. Если показатель временной изменчивости опорного участка примерно соответствует показателю отличия опорного участка и окружающего его фона, то измерение координат вряд ли возможно. В то же время, если измерение координат возможно, т.е. опорный участок и фон не похожи друг на друга, то показатель отличия опорного участка от фона будет больше, чем показатель временной изменчивости опорного участка [2].

Показатель отличия изображения опорного участка от окружающего фона можно охарактеризовать величиной $\min_{(\alpha, \beta) \in \Gamma} F(\alpha, \beta, n)$, где Γ – множество координат, соответствующих границе зоны поиска. Показатель отличия эталонного изображения на кадре n от изображения

опорного участка на кадре $n+1$ описывается величиной $\min_{(\alpha, \beta) \in W} F(\alpha, \beta, n+1)$, т.е. минимальным значением критериальной функции в $(n+1)$ -м кадре, которое характеризует межкадровую изменчивость изображения опорного участка. Таким образом, если $\min_{(\alpha, \beta) \in \Gamma} F(\alpha, \beta, n)$ больше

$\min_{(\alpha, \beta) \in W} F(\alpha, \beta, n+1)$, то можно утверждать, что измерение координат возможно. Следовательно, отношение этих величин можно использовать как признак, оценивающий возможность измерения координат опорного участка в $(n+1)$ -м кадре:

$$KF_1(n+1) = \frac{\min_{(\alpha, \beta) \in \Gamma} F(\alpha, \beta, n)}{\min_{(\alpha, \beta) \in W} F(\alpha, \beta, n+1)}. \quad (3)$$

Критерий работоспособности № 2. Второй критерий основан на анализе поведения критериальной функции вида (2) в окрестности минимума. Минимум критериальной функции F определяется выражением:

$$(\alpha^*, \beta^*) = \arg \min_{(\alpha, \beta) \in L} \sum_{(i, j) \in H} |l(i + \alpha, j + \beta, n) - h(i, j, n)|. \quad (4)$$

Для расчета критерия работоспособности определяется среднее значение в окрестности точки (α^*, β^*) размером $(2k+1) \times (2k+1)$ точек:

$$M = \frac{\sum_{\alpha=\alpha^*-k}^{\alpha^*+k} \sum_{\beta=\beta^*-k}^{\beta^*+k} F(\alpha, \beta, n) - F(\alpha^*, \beta^*, n)}{(2 \cdot k + 1)^2 - 1}. \quad (5)$$

Затем определяется число точек лежащих ниже уровня T , вычисляемого по формуле:

$$T = z \cdot M, \quad (6)$$

где z – коэффициент, определяемый экспериментальным путем (на практике используется $z = 1,4$ и $k = 3$).

В том случае, если число точек критериальной функции, лежащих ниже уровня T , меньше порогового значения, можно говорить об уверенном измерении координат опорного участка.

Критерий работоспособности № 3. Критерий основан на анализе градиентного изображения. По данному изображению можно судить о контрасте опорного участка. Критерий работоспособности будем рассматривать как отношение оценки сигнал-шум.

Поскольку выбор положения опорных участков производится в областях с максимальным контрастом по яркости в соответствии с формулой (1), то в качестве сигнала можно рассматривать величину:

$$L_Z = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum_{(x, y) \in Z} (Z_{\Delta_x, \phi}(x, y, n))^2} + \frac{1}{\sum_{(x, y) \in Z} (Z_{\Delta_y, \phi}(x, y, n))^2} \right)^{-1}}, \quad (7)$$

где $Z_{\Delta_x, \phi}(x, y, n)$, $Z_{\Delta_y, \phi}(x, y, n)$ – градиентные изображения зоны поиска, сглаженные усредняющим фильтром. Размер маски фильтра соответствует размеру эталона.

В качестве характеристики, определяющей шум, будем рассматривать его среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_ξ . Подход к оценке СКО шума приведен в работе [6]. Использование данной величины позволяет нормировать оценку отношения сигнал-шум. Таким образом, критерий работоспособности можно определить следующим образом:

$$KF_3 = \frac{L_Z}{\sigma_\xi} \quad (8)$$

Экспериментальные исследования

Сравнительные исследования рассматриваемых критериев работоспособности проводились с использованием натуральных сюжетов, снятых в видимом диапазоне. Длительность сюжетов варьировалась от 1000 до 1400 кадров, средняя длительность – 1270 кадров. На видеосюжетах объекты были неподвижны. В процессе съемки диафрагма камеры постепенно закрывалась и открывалась вновь, что обеспечивало изменение освещенности сцены. На рис. 1 приведены кадры одного из сюжетов при различной степени открытости диафрагмы.

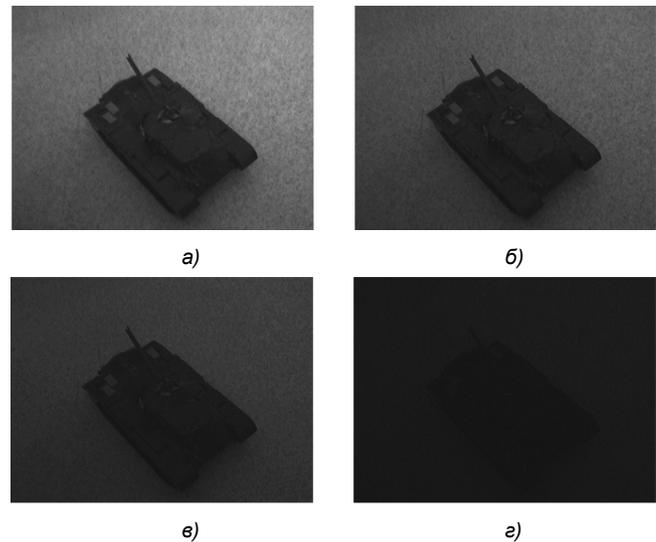


Рис. 1. Примеры кадров из тестового сюжета при различных значениях диафрагмы видеодатчика

Для каждого сюжета выбиралось 8 опорных участков размером 32×32 пикселя. Опорные участки выбирались таким образом, чтобы они включали в себя изображения частей объекта, изображения фона, а также участки, содержащие одновременно и фон и части объекта. Положение опорных участков, указанное человеком-экспертом на первом кадре, принималось за эталонное (истинное) положение. На рис. 2 представлен кадр из тестового сюжета, на котором квадратами показаны выбранные опорные участки.

Для каждого видеосюжета местоположение опорных участков в кадре определялось разностным алгоритмом. При возникновении больших ошибок в оценке положения осуществлялся перезапуск алгоритма. При этом по истинным координатам формировалось новое целеуказание, на основе которого выполнялось обновление эталонного изображения. На основании сравнения измеренных и эталонных координат принималось решение о пригодности разностного алгоритма для оценки коор-

динат конкретного опорного участка на каждом кадре видеопоследовательности. Параллельно с этим на каждом кадре для опорных участков вычислялись значения трёх критериев работоспособности. Таким образом, для каждого критерия работоспособности были сформированы два массива значений, соответствующих кадрам на которых разностный алгоритм был «работоспособен» и «не работоспособен».

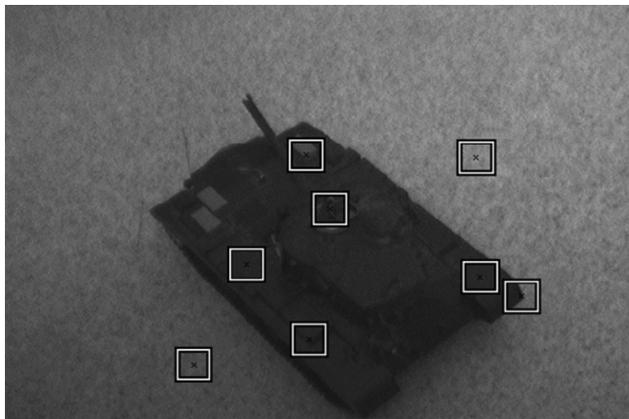


Рис. 2. Опорные участки

Согласно методике, приведенной в [5], для оценки работоспособности разностного алгоритма осуществляется переход от значений критерия работоспособности к показателю качества, принимающим значения «работает»/«не работает», путём сравнения критериев работоспособности с пороговыми значениями. Процедура нахождения пороговых значений по полученным массивам критериев работоспособности подробно описана там же. При определении пороговых значений возможны ошибки двух видов:

- ошибка первого рода – ошибочное принятие решения, что алгоритм неработоспособен,
- ошибка второго рода – ошибочное принятие решения, что алгоритм работоспособен.

Результаты исследований критериев приведены в табл. 1.

Таблица 1. Пороговые значения признаков и ошибки классификации

Критерий работоспособности	Пороговое значение	Ошибка первого рода, %	Ошибка второго рода, %
№1	1,3	0	8
№2	152	5	47
№3	0,9	0	4

Вычислительная сложность расчета критерия работоспособности № 1 и критерия работоспособности № 2 в большей степени определяется затратами на нахождение минимума критериальной функции вида (2). Если пренебречь несколькими операциями вычитания и деления, то из формул (3) и (5) следует, что вычислительная сложность двух критериев отличается затратами на расчет показателя отличия изображения опорного участка от окружающего фона $\min_{(\alpha, \beta) \in \Gamma} F(\alpha, \beta, n-1)$, кото-

рая рассчитывается при работе разностного алгоритма на $n-1$ кадре. Таким образом, можно прийти к выводу,

что затраты на вычисление признаков примерно одинаковы. При использовании этих двух критериев для оценки работоспособности многоэталонного алгоритма вычислять минимум критериальной функции вида (2) необходимо для каждого опорного участка. Следовательно, вычислительная сложность критерия работоспособности многоэталонного алгоритма будет расти с увеличением количества опорных участков.

Вычислительные затраты критерия работоспособности №3 главным образом определяются расчетом величины L_z в формуле (7). Учитывая, что данная величина вычисляется в многоэталонном алгоритме при выборе опорных участков по формуле (1), то вычислительной сложностью данного критерия можно пренебречь.

Заключение

Результаты сравнительного исследования эффективности критериев с точки зрения ошибок принятия решений позволяют сделать выводы, что использование критерия работоспособности на основе анализа градиентного изображения (критерия № 3) целесообразно для анализа работоспособности многоэталонного алгоритма оценки координат объектов. Невысокая вычислительная сложность позволяет использовать данный критерий для повышения эффективности перехода на многоэталонный алгоритм для оценки координат объектов больших размеров.

Исследования выполнены при использовании Стипендии Президента РФ СП-2598.2016.5.

Литература

1. Стротов В.В., Корепанов С.Е. Слежение за объектом, размеры которого значительно изменяются со временем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2012. – № 39. – С. 9-14.
2. Бабаян П.В., Смирнов С.А. Слежение за объектом на основе алгоритма сопоставления с эталоном при одновременном наблюдении в видимом и инфракрасном диапазонах // Цифровая обработка сигналов.– №4. – 2010. – С.18-21.
3. Алпатов Б.А., Селяев А.А., Степашкин А.И. Цифровая обработка изображений в задаче отслеживания движущегося объекта // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1985. – №2. – С. 39-43.
4. Стротов В.В. Выбор опорных участков в многоэталонном алгоритме определения параметров геометрических преобразований изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2009. – №2(28). – С.93–96.
5. Бабаян П.В., Смирнов С.А. Оценивание ожидаемой работоспособности алгоритмов измерения координат объектов // ГрафиКон' 2010: 20-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению. – Санкт-Петербург. – 2010. – С. 329-330.
6. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.