

УДК 621.397.48:004.383.5

А.В. Беляев, В.М. Карташов

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ КООРДИНАТ НА ИЗОБРАЖЕНИИ В МУЛЬТИМЕДИЙНОМ СТРЕЛКОВОМ ТРЕНАЖЕРЕ

Рассмотрена задача обнаружения координат пулевых отверстий и отметок от лазерного излучателя на фоне проекционного полотна мишени мультимедийного стрелкового тренажера. Предложены алгоритмы обработки изображений и оценка пространственных координат наблюдаемых отметок. Методом моделирования выполнена оценка количественных характеристик алгоритмов. Рассмотрены практические аспекты применения данных алгоритмов в мультимедийных стрелковых тренажерах.

**Ключевые слова:** определение координат, стрелковые тренажеры, мультимедийные тренажеры, обработка изображений.

### Введение

При обработке и анализе изображений в различных областях деятельности встречаются задачи обнаружения фрагмента с известными параметрами (фрагмент – элемент изображения, содержащий искомый объект, символ и т.п.), а также задачи измерения пространственных координат таких фрагментов [1]. Существует значительное количество методов решения подобных задач, основанных на фильтрации изображений, корреляционной обработке, на использовании искусственных нейронных сетей и методов нечеткой логики и так далее [2]. Однако, вычислительная эффективность и результаты решения задач обнаружения и измерения параметров этими методами не идентичны.

К системам, в которых решаются подобные задачи обнаружения и измерения, относятся мультимедийные стрелковые тренажеры [3]. В них на фоне изменяющегося и, чаще всего, неоднородного видеоизображения проводится поиск мелкомасштабных объектов – пулевых отверстий. Мультимедийные стрелковые тренажеры, называемые «универсальными», обеспечивают работу системы в двух режимах: боевом, с использованием реального или пневматического оружия, и в режиме имитации стрельбы, с использованием лазерных насадок. В последнем случае искомым объектом на изображении будет лазерное пятно.

### 1. Модели сигналов и помех

Рассмотрим задачу обнаружения-измерения в применении к двумерному сигналу (изображению)  $s(x,y)$ . Пусть наблюдаемый сигнал является смесью полезного сигнала  $e(x,y)$ , аддитивной помехи  $c(x,y)$  и шума сенсора  $n(x,y)$ :

$$s(x,y) = e(x,y) + c(x,y) + n(x,y). \quad (1)$$

Задачу обработки сформулируем следующим образом: по реализации  $s(x,y)$ , доступной наблюдению,

необходимо принять решение о наличии в составе  $e(x,y)$  искомого фрагмента и оценить пространственные координаты этого фрагмента в пределах изображения. Подобные задачи характерны для различных систем обработки, распознавания и анализа изображений – в частности, для мультимедийных лазерных стрелковых тренажеров и систем машинного зрения.

В данном случае искомым сигналом  $s_0(x,y)$  является пятно от лазерного излучателя на мишени или пулевая пробоина, аддитивной помехой  $c(x,y)$  – видеоизображение, проецируемое на мишень, и фоновая засветка мишени посторонними источниками света. Компонент смеси  $n(x,y)$  представлен шумом регистрирующего устройства – видеокамеры.

Для решения задачи обнаружения искомого сигнала  $s_0(x,y)$  необходимо описать его форму и размеры. В случае работы стрелкового тренажера в боевом режиме необходимо придерживаться тех размеров пулевых отверстий, которые оставляет на полотне мишени конкретный вид патронов. Однако, форма пулевого отверстия может незначительно меняться от выстрела к выстрелу: в зависимости от угла попадания в мишень и материала полотна мишени. Кроме того, вероятность и точность определения пулевого отверстия зависит от разрешающей способности системы и выбранного алгоритма в случае попадания пули в непосредственной близости от одного из пулевых отверстий от предыдущих стрельб.

В режиме имитации стрельбы размер лазерного луча будет зависеть от расстояния. В идеальном случае лазерный луч оставляет на мишени отметку в виде точки. Такую отметку можно представить в виде двумерной дельта-функции  $e(x,y) = \delta(x,y)$ . Этот случай соответствует лазерному лучу бесконечно малого поперечного сечения, распространяющемуся в однородной изотропной среде и падающему на поверхность мишени под прямым углом. Очевидно, что в реальной системе подобные упрощения непримени-

мы. Реальный лазерный излучатель имеет оптическую систему с функцией рассеяния точки (ФРТ)  $h_1(x,y)$  [4]. Изображение пятна на мишени может быть определено следующим образом:

$$e_m(x,y) = \delta(x,y) \otimes h_1(x,y), \quad (2)$$

где  $\otimes$  – символ свёртки. В то же время, регистрирующая видеокамера также имеет оптическую систему с некоторой ФРТ  $h_2(x,y)$ . В результате наблюдаемое камерой изображение получит вид

$$e(x,y) = e_m(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (3)$$

Тогда  $e(x,y) = (\delta(x,y) \otimes h_1(x,y)) \otimes h_2(x,y)$ .

Поскольку

$$\delta(x,y) \otimes h_1(x,y) = h_1(x,y), \quad (4)$$

то изображение искомого пятна на плоской поверхности мишени можно записать в виде

$$e(x,y) = h_1(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (5)$$

Следовательно, вид пятна определяется только характеристиками оптических систем лазера и регистрирующей камеры. Это утверждение будет использовано в дальнейшем при анализе алгоритмов обработки исследуемых изображений.

В настоящей статье формы лазерного пятна и пулевой пробойны приняты близкими к идеальным. Влияние их деформации на характеристики обнаружения и точность определения координат будут предметом последующих исследований.

## 2. Методы обнаружения фрагментов и измерения их пространственных координат

Анализ литературных источников показал, что для решения рассматриваемой задачи могут быть использованы следующие методы: корреляционной обработки; согласованной фильтрации; поиска центра фрагмента; моментов; детекторы границ.

Процедура корреляционной обработки, по аналогии с обработкой одномерных сигналов [2] состоит в следующем. Вычисляется взаимная корреляционная функция

$$R_{S,S_0}(\Delta x, \Delta y) = \iint_{x,y} s(x+\Delta x, y+\Delta y) s_0(x,y) dx dy \quad (6)$$

между обрабатываемым изображением  $s(x,y)$  и образцовым изображением  $s_0(x,y)$ , причем в роли образцового изображения выступает принятая в задаче модель изображения лазерного пятна (5). При этом в результате поиска максимума функции  $R_{S,S_0}(\Delta x, \Delta y)$  получаем оценки  $\Delta x, \Delta y$  – относительных смещений образцового изображения относительно обрабатываемого. Значения максимума функции используется для решения задачи обнаружения, подобно случаям обнаружения одномерных сигналов в многоканальном корреляционном приемнике [1]. Таким образом, выражение (6) описывает алгоритм функционирования многоканального по пространственным координатам корреляционного приемника обнаружения-измерения.

Выражение (6) может быть вычислено также с помощью процедуры преобразования Фурье

$$R_{S,S_0}(\Delta x, \Delta y) = F^{-1}(F(s) \cdot F^*(s_0)), \quad (7)$$

где  $F$  – преобразование Фурье,  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье,  $F^*$  – комплексное сопряжение.

Вычислительная сложность процедуры обнаружения требуемого фрагмента определяется размерами исходного изображения и может оказаться существенной, что затруднит реализацию процедуры в реальном масштабе времени – в особенности при многоальтернативном обнаружении. Снизить вычислительные затраты можно, используя рассчитанное один раз  $F^*(s_0)$ , так как в последовательных сеансах обработки изображений в обеих рассматриваемых системах решается задача обнаружения одного и того же объекта – будь то область засветки от лазерного излучателя или заранее заданный образ для системы видеонаблюдения. Кроме того, искомое изображение можно разбить на сегменты и производить обработку в пределах этих сегментов, выбирая затем максимальный отклик из уравнения (7) как признак принадлежности искомого объекта данному сегменту изображения.

Следующим является метод согласованной фильтрации. Он реализуется путем обработки наблюдаемого изображения двумерным согласованным фильтром:

$$z(\Delta x, \Delta y) = s(x,y) \otimes h(x,y). \quad (8)$$

В выражении (5)  $h(x,y)$  представляет собой импульсную характеристику фильтра, которая повторяет искомый сигнал  $s_0(x,y)$  и является произведением двух ФРТ (оптических систем лазера и регистрирующей камеры соответственно):

$$h(\Delta x, \Delta y) = h_1(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (9)$$

После вычисления выражения (8), максимальное значение  $z(\Delta x, \Delta y)$  дает информацию об энергии сигнала и может использоваться в задаче обнаружения, а координаты точки  $\max(z(\Delta x, \Delta y))$  дают оценку разности между координатами искомого фрагмента на изображении и на шаблоне [5]. Фактически, данный метод эквивалентен методу корреляционного приема, однако при малых размерах обнаруживаемого объекта может быть более эффективным по критерию использования вычислительных ресурсов.

Далее рассмотрим метод поиска центра фрагмента. Процедура поиска центра фрагмента заключается в итерационном оценивании координат центра искомой области и реализуется следующим образом.

По имеющемуся изображению  $s(x,y)$  оценивается предельное значение яркости  $S_{max}$ , после чего в соответствии с известными шумовыми характеристиками сенсора определяются пороговые уровни  $s_1$  и  $s_2$ . После этого выделяются все точки изображения, для которых  $s(x,y) > s_1$ , и в окрестностях каждой из них начинается поиск непрерывных областей, в пределах которых  $s(x,y) > s_2$ . При этом, одна точка может войти лишь в одну область. После того, как точка была

внесена в список для одной из областей, она исключается из дальнейшего рассмотрения.

Итерационная процедура поиска центра конкретной области выполняется следующим образом [6]. Начиная с некоторой точки, принадлежащей данной области, проводится горизонтальное сечение, в пределах которого определяется непрерывный отрезок максимальной длины, для всех точек которого  $s(x,y) > s_2$ . Координаты крайних точек отрезка  $x_1, x_2$  фиксируются и определяется координата  $x'(1) = (x_1 + x_2)/2$ . В точке с горизонтальной координатой  $x'(1)$  проводится вертикальное сечение, для которого происходит аналогичный процесс определения координат границ и центра по вертикали. Таким образом, получаем координату  $y'(1)$ . Итерации продолжают до тех пор, пока погрешность определения не станет меньше заданного предела. Это контролируется по разностям оценок  $\Delta x(i) = x'(i) - x'(i-1)$ ,  $\Delta y(i) = y'(i) - y'(i-1)$ . Из всех областей, определенных данным методом, выбирается одна – та, для которой площадь минимально отличается от площади искомого фрагмента.

Метод моментов заключается в вычислении центра масс изображения согласно соотношениям:

$$x' = \frac{1}{p} \sum_x \sum_y s(x,y) \cdot K_x(x,y), \quad (10)$$

$$y' = \frac{1}{p} \sum_x \sum_y s(x,y) \cdot K_y(x,y), \quad (11)$$

где  $p = \sum_x \sum_y s(x,y)$ ,

$$K_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n_x \\ 1 & 2 & \dots & n_x \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2 & \dots & n_x \end{bmatrix}, \quad K_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2 & \dots & 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_y & n_y & \dots & n_y \end{bmatrix}.$$

Данный метод является расширением метода моментов [7] для случая двумерного сигнала (т.е. изображения) и применим для обнаружения контрастного объекта на темном фоне (в частности, пятна от лазерного излучателя). В то же время, наличие посторонней засветки и аддитивного шума приводит к резкому возрастанию погрешностей оценивания координат объекта этим методом.

Проанализируем метод детектирования границ. Выделение границ (выделение краёв) – термин, используемый в теории обработки изображений и компьютерного зрения, а точнее в области поиска и выделения объектов. Основывается на алгоритмах, которые выделяют точки цифрового изображения, где резко изменяется яркость или есть другие виды неоднородностей. Основной целью обнаружения резких изменений яркости изображения является фиксация важных событий и изменений. Они могут отражать различные предположения о модели формирования изображения. В данной работе предложено использовать детектор границ Канни [8].

Алгоритм состоит из пяти шагов:

1. Сглаживание. Размытие изображения для удаления шума.
2. Поиск градиентов. Границы отмечаются там, где градиент изображения максимален.
3. Подавление не-максимумов. Только локальные максимумы отмечаются как границы.
4. Двойная пороговая фильтрация. Потенциальные границы определяются порогами.
5. Алгоритм реализации детектора границ Канни изображен на рис. 1.

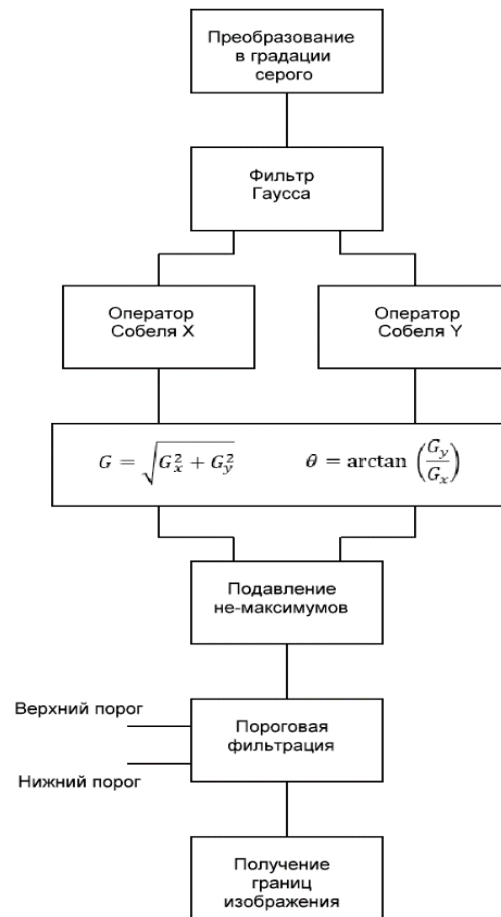


Рис. 1. Алгоритм работы детектора границ Канни

На первом шаге изображение сглаживается для подавления в нем шумов и приближения границ к идеальным и замкнутым. Чаще всего используется Гауссов фильтр, параметр размытия которого выбирают в зависимости от исследуемых изображений. В случае с определением лазерного пятна на практике оказалось более предпочтительным применение больших значений параметра размытия, до  $\sigma = 10$ . Для пулевых отверстий желательно иметь параметр размытия минимальным или не учитывать размытие вовсе. Функция Гаусса для двумерного случая будет иметь вид

$$f(x,y) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sigma^2) \cdot \exp(-(x^2 + y^2) / (2 \cdot \sigma^2)). \quad (12)$$

На следующем шаге применяется оператор Собеля. По сути, это дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения.

Результатом применения оператора Собеля в каждой точке изображения является либо вектор градиента яркости в этой точке, либо его норма. Оператор Собеля основан на свёртке изображения небольшими целочисленными фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях, поэтому его относительно легко вычислять. С другой стороны, используемая им аппроксимация градиента достаточно грубая, особенно это сказывается на высокочастотных колебаниях изображения. Оператор использует ядра  $3 \times 3$ , с которыми сворачивают исходное изображение для вычисления приближенных значений производных по горизонтали и по вертикали.

Пусть  $A$  исходное изображение, а  $G_x$  и  $G_y$  – два изображения, где каждая точка содержит приближенные производные по  $x$  и по  $y$ . Они вычисляются следующим образом:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes A, \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \otimes A \quad (13)$$

В каждой точке изображения значение величины градиента можно приближенно вычислить, используя полученные приближенные значения производных поэлементно к изображению:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (15)$$

Используя эту информацию, можно также вычислить направление градиента

$$\theta = \arctg(G_y/G_x), \quad (16)$$

где, к примеру, угол  $\theta$  равен нулю для вертикальной границы, у которой темная сторона слева.

Далее следует процедура подавления немаксимумов. Пикселями границ объявляются пиксели, в которых достигается локальный максимум градиента в направлении вектора градиента. Значение направления должно быть кратно  $45^\circ$ .

Следующий шаг – применение порога, чтобы определить находится или нет граница в данной точке изображения. Чем меньше порог, тем больше границ будет обнаруживаться, но тем более восприимчивым к шуму станет результат, выделяя лишние данные изображения. Наоборот, высокий порог может проигнорировать слабые края или получить границу фрагментами. Выделение границ Канни использует два порога фильтрации: если значение пикселя выше верхней границы – он принимает максимальное значение (граница считается достоверной), если ниже – пиксель подавляется; точки со значением, попадающим в диапазон между порогами, принимают фиксированное среднее значение.

### 3. Анализ методов обработки изображений

На рис. 2, 3 представлены результаты модельного эксперимента при разрешении исходного изображения  $800 \times 600$  пикселей и отметки цели  $s_0(x, y)$  в виде окружности. В эксперименте формируется

изображение, содержащее искомый фрагмент и аддитивный белый гауссов шум. Затем производится оценивание координат искомого фрагмента всеми рассматриваемыми методами. На рисунках приняты следующие обозначения: 1 – корреляционный приемник, 2 – процедура поиска центра фрагмента, 3 – фильтровый приемник, 4 – оценка координат центра тяжести, 5 – детектор границ. Погрешности оценивания выражены в миллиметрах.

Из рис. 2 видно, что корреляционный и фильтровый приемники (1, 3) обеспечивают практически идентичные результаты, итерационный метод (2) оценивания несколько уступает им. Метод с использованием детектора границ (5) имеет достаточно высокую погрешность в случае сильной зашумленности изображения. Наибольшей погрешностью обладает метод центра масс (4).

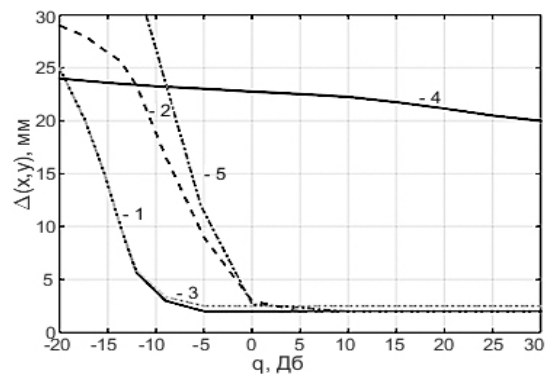


Рис. 2. Зависимости погрешностей измерения координат от отношения сигнал/шум

Осуществлена также оценка характеристик обнаружения искомого объекта на изображениях, показанных на рис. 3 в виде зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум. Как видно, все методы плохо справляются с обнаружением искомого объекта при малом отношении  $q$  сигнал/шум. Это создает необходимость в предварительной фильтрации входящего видеопотока и создания условий, при которых выбранный метод обеспечит приемлемую вероятность правильного обнаружения, исходя из требований к работе мультимедийных стрелковых тренажеров. Оценки быстродействия рассмотренных методов приведены в табл. 1.

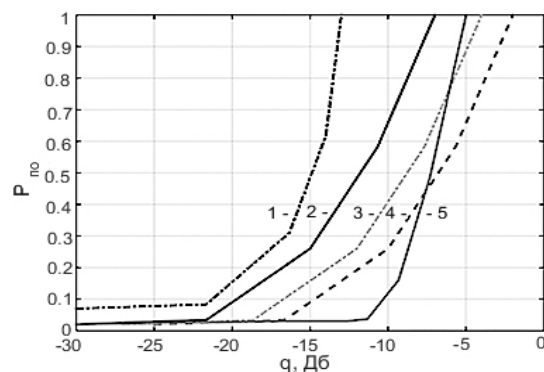


Рис. 3. Кривые вероятности правильного обнаружения в зависимости от отношения сигнал/шум

Таблиця 1

Оценки быстродействия рассмотренных методов

Разрешение	Время выполнения, с				
	Корреляционная обработка (1)	Поиск центра фрагмента (2)	Фильтровый приемник (3)	Оценка центра тяжести (4)	Детекторы границ (5)
64x64	0.0014	0.0823	0.0010	0.0038	0.0217
128x128	0.0020	0.0124	0.0028	0.0164	0.0017
256x256	0.0048	0.0236	0.0114	0.0822	0.0026
512x512	0.0166	0.0922	0.0519	0.2746	0.0080
768x768	0.0418	0.1532	0.1237	0.6401	0.0193
1024x1024	0.0608	0.4587	0.2219	1.0338	0.0296
1280x1280	0.1136	1.2347	0.3533	1.8869	0.0499
1600x1600	0.1656	1.5696	0.5581	3.0465	0.0848
2048x2048	0.2574	1.9477	0.9026	4.4834	0.1407

Вычисления производились с использованием центрального процессора Intel i7-3770K (4x3.5 ГГц). Снижения вычислительных затрат для всех рассматриваемых методов обработки изображений можно добиться, реализовав следящий метод измерения координат. В этом случае предполагается, что координаты объекта от одного кадра к другому не могут измениться на большую величину, следовательно, можно ограничиться поиском объекта в окрестности его координат, измеренных в предыдущем цикле. Дополнительным резервом вычислительной мощности можно считать возможность применения средств параллельной обработки – в частности, графических процессоров, многопроцессорных вычислительных систем, а также кластеров.

Результаты проведенных измерений позволяют сделать заключение, что такие методы как: поиск центра фрагмента (2), фильтровый приемник (3), оценка координат центра тяжести (4) непригодны для работы в режиме реального времени. Для обработки видеопотока в реальном времени рекомендуется использовать методы (1, 5) корреляционной обработки или детектирования границ.

### Выводы

В статье проведен анализ алгоритмов обработки изображений, которые могут быть использованы в мультимедийном стрелковом тренажере, выполненна оценка количественных характеристик алгоритмов методом моделирования. Наилучшие результаты обнаружения «пробоины», формируемой стрелковым оружием, или обнаружения светового пятна, образуемого лучом лазерного оружия, показали ме-

тоды корреляционной обработки и детектирования границ. Использование предложенных алгоритмов обработки на практике позволит существенно повысить качественные показатели мультимедийных стрелковых тренажеров.

### Список литературы

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Форсайт Д.А. Компьютерное зрение. Современный подход. / Д.А. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
3. Патент України №59467, МПК F41 G 3/26. Електронний лазерний стрілецький тренажер [Текст] / Зубков О.В., Коритцев І.В., Олейніков В.М., Сідоров Г.І., Кондрашов С.В.; опубл. 10.05.2011, бюл. № 9/2011.
4. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис. – М.: Техносфера, 2003. – 395 с.
5. Papageorgiou C. A Trainable System for Object Detection. / C. Papageorgiou, T. Poggio // International Journal of Computer Vision. – 2000. – 38(1). – С. 15-33.
6. Scheiderman H. Object Detedtion Using the Statistic of Parts. / H. Scheiderman, T. Kanadae // International Journal of Computer Vision. – 2004. – 56(3). – С. 151-177.
7. Янин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. / В.В. Янин. – М.: Машиностроение, 1994. – 112 с.
8. Zhuowen Tu et. Al. Parsing: Unifying Segmentation, Detection and Recognition / Zhuowen Tu et. Al. // Int. Journal of Computer Vision. – 2005. – 63(2). – С. 114-140.

Поступила в редколлегию 6.08.2015

**Рецензент:** д-р физ-мат. наук, проф. В.А. Тихонов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАДАНОЇ ФОРМИ НА ЗОБРАЖЕННІ В МУЛЬТИМЕДІЙНОМУ СТРЕЛЦЬКОМУ ТРЕНАЖЕРІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ КООРДИНАТ

О.В. Беляев, В.М. Карташов

У матеріалах статті розглянута задача виявлення координат кульових отворів і відміток від лазерного випромінювача на фоні проекційного полотна мішені мультимедійного стрілецького тренажера. Запропоновано алгоритми обробки зображень і оцінка просторових координат спостережуваних відміток. Проведено оцінку кількісних характеристик алгоритмів методом моделювання. Найкращі результати виявлення «пробоїни», що формується стрілецькою зброєю, або виявлення світлового плями, утвореного променем лазерної зброї, показали методи кореляційної обробки і детектування межі. Запропоновано застосування даних алгоритмів для роботи в мультимедійних стрілецьких тренажерах на практиці.

**Ключові слова:** визначення координат, стрілецькі тренажери, мультимедійні тренажери, обробка зображень.

**DETECTION OF OBJECTS WITH GIVEN SHAPE ON THE IMAGE  
IN A MULTIMEDIA SHOOTING SIMULATOR AND DETERMINING THEIR COORDINATES**

O.V. Belyaev, V.M. Kartashov

*The materials of the article describe the problem of detecting the coordinates of bullet holes and marks of the laser transmitter on the background projection screen of multimedia shooting simulator. Algorithms for image processing and evaluation of the spatial coordinates of the observed levels are presenting. An assessment of the quantitative characteristics of algorithms is carried out by simulation. The best results in the detection of "holes" formed by small arms or detection of light spot formed by the laser beam weapons were shown by correlation processing methods and edge detection. The use of these algorithms in multimedia shooting simulator in practice is proposed.*

**Keywords:** *determining the coordinates, shooting simulator, multimedia simulator, image processing.*