

УДК 681.3

М. Г. Грибов, В. М. Хачумов*(Переславль-Залесский)***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ
ПО РАСТРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Рассматривается задача автоматического определения геометрических параметров объекта по растровым изображениям, полученным с телевизионной камеры. Предлагаются методы выделения на предварительно обработанных кадрах отрезков прямых линий и дуг окружностей, являющихся частью образа анализируемого объекта. По выделенным примитивам производится измерение таких визуально наблюдаемых параметров, как ориентация и размер изображения, что позволяет по последовательности кадров определить для известного объекта дальность, скорость перемещения и другие динамические параметры. Предлагается альтернативный способ измерения параметров путем сравнения реального изображения с геометрической моделью объекта. Модельный путь решения задачи позволяет проводить измерения в реальном времени. Приводятся результаты экспериментального выделения и измерения графических примитивов на растровых изображениях цели.

Введение. Задача определения динамических параметров объекта по входным изображениям возникает, например, в пилотируемых космических аппаратах при оценке космонавтом цели с различных расстояний. Решение требует распознавания на получаемых телевизионных кадрах в реальном масштабе времени характерных образов цели (кругов, прямоугольников, отрезков линий, дуг и т. п.) и их измерения с приемлемой точностью коррекции последующих действий. Трудность формализации решения данной задачи заключается в низком качестве телевизионных изображений, наличии разброса точек линий и всевозможных накладываемых помех. Поэтому нужны, прежде всего, надежные методы, учитывающие структурные особенности цели, способные вырабатывать решения в сжатые интервалы времени.

Будем сканировать растровое изображение, полученное в результате предварительной обработки телевизионного кадра (оцифровки, фильтрации, оконтуривания), окном прямоугольной формы. В предположении, что в окне находится примитив (отрезок линии или дуги), осуществляется подбор его параметров. Способы подбора прямой линии, аппроксимирующей множество точек, предложены в работах [1–3], а примыкающая к данному направлению задача «векторизации» растровых изображений рассмотрена, например, в [4]. Общий подход к достижению поставленной цели заключается в переходе к бинарному изображению, точки (x, y) которого имеют интенсивность $m(x, y) = 1$, если точка подсвечена, и $m(x, y) = 0$ в противном случае.

Предполагается, что аппроксимирующая линия $y = kx$ проходит через «центр тяжести» объекта, причем положение точки центра тяжести инвариантно относительно операций масштабирования и поворота. Обозначим через σ среднеквадратичное расстояние точек до линии. Угол $\varphi = \arctg(k)$, при котором значение σ минимально, будем считать углом наклона линии положения. Решая задачу на экстремум: $\partial\sigma/\partial\varphi = 0$, получаем параметры наилучшего приближения.

Вопросы распознавания кривых линий на растровых изображениях рассматривались, например, в работах [5–7]. Сложность прямого оптимизационного решения задачи, связанного с приближением группы точек дугами окружности $\{a, b, R\}$, где a, b – координаты центра; R – радиус искомой окружности, заключается в выборе приемлемого критерия наилучшего приближения. Так, если взять в качестве критерия значение

$$S = \sum_{i=1}^m [y_i + b - \sqrt{R^2 - (x_i - a)^2}]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

то решение прямой оптимизационной задачи сильно усложняется. Значение

$$S = \sum_{i=1}^m ((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2) \rightarrow \min, \quad (2)$$

взятое в качестве критерия, приводит к неверным результатам, так как будут найдены дуги окружности с минимальным радиусом. Решение задачи простейшим подбором величины R требует больших затрат времени. Не дает преимуществ и переход к параметрическому представлению кривых.

В настоящей работе авторы попытались обойти указанные трудности, предложив соответствующий алгоритм восстановления дуги окружности по трем взвешенным точкам. Здесь в отличие от прямой оптимизационной задачи оценочные критерии (1), (2) используются только на заключительной стадии для сравнения полученных результатов и выбора наилучшего варианта приближения.

Непосредственное извлечение динамической информации из телевизионных изображений в реальном времени требует решения сложных задач, относящихся к распознаванию образов. Практически реализовать описанные выше подходы и обеспечить надежность их работы при высоком уровне шумов весьма затруднительно из-за больших временных затрат, а также возможных значительных ошибок измерения. Это обстоятельство до недавнего времени предопределяло отказ от использования телекамер в качестве измерительного канала. Перспективным видится другой способ измерения параметров объекта по его графическому изображению, позволяющий, в принципе, проводить измерения в реальном времени. Он связан с геометрическим моделированием объектов в целом и их отдельных составляющих. Основа метода заключается в поиске значений параметров, при которых модельное изображение объекта максимально совпадает с реальным. Для этого должны быть разработаны методы сравнения изображений и поиска оптимальных параметров модели.

Выделение отрезков прямых линий. В настоящем разделе предлагается использовать подходы [3, 8] для определения ориентации и линейных размеров плоского объекта. Пусть в окне прямоугольной формы задано непре-

рывное изображение объекта, точки (x, y) которого имеют интенсивность $m(x, y)$. Для дискретного случая функции, вместо непрерывной функции $m(x, y)$, имеем матрицу интенсивностей $[m(i, j)]$. С целью построения вектора положения будем аппроксимировать заданный объект прямой линией.

Уравнение, определяющее угол наклона линии положения объекта $y = kx$ с началом координат, перенесенным в центр тяжести (X_σ, Y_σ) , имеет вид

$$(s_1 - s_2)\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - s_0(\sin^2(\varphi) - \cos^2(\varphi)) = 0, \quad (3)$$

где

$$s_0 = \sum_i \sum_j m(i, j)(j - Y_\sigma)(i - X_\sigma);$$

$$s_1 = \sum_i \sum_j m(i, j)(i - X_\sigma)^2; \quad s_2 = \sum_i \sum_j m(i, j)(j - Y_\sigma)^2;$$

$$X_\sigma = \frac{1}{\mu} \sum_i \sum_j im(i, j); \quad Y_\sigma = \frac{1}{\mu} \sum_i \sum_j jm(i, j).$$

Решив уравнение (3), получим

$$\sin(\varphi) = k_1^2 / (k_1^2 + k_2^2), \quad \cos(\varphi) = k_2^2 / (k_1^2 + k_2^2), \quad (4)$$

где $k_1 = s_1 - s_2 \pm \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + 1}$; $k_2 = 2s_0$.

Нетрудно проверить, что минимум значения σ обеспечивается при взятии результата извлечения корня со знаком «плюс».

Полученными формулами (4) можно пользоваться для вычисления параметров линии наилучшего приближения. Они позволяют оценивать степень приближения и принимать решение о целесообразности аппроксимации. Экспериментальная проверка показала возможность их использования в задачах распознавания образов, инвариантных относительно линейных преобразований пространства признаков. Алгоритмы поиска и измерения геометрических характеристик на их основе отличаются простотой, что дает значительный выигрыш во времени. Развитие данного метода на трехмерный случай изложено в работе [9].

Выделение дуг окружностей. Дуги окружностей наиболее часто используются в машиностроительном черчении для аппроксимации кривых с целью получения плавных соединений. По этой же причине многие детали технических объектов имеют профили, создаваемые дугами окружностей. Рассмотрим один из возможных подходов к выделению дуг окружностей, наилучшим образом приближающих заданную группу точек в сканирующем окне прямоугольной формы. Подход основан на восстановлении дуги окружности по трем взвешенным точкам.

Пусть в результате сканирования некоторой прямоугольной области растрового изображения окном прямоугольной формы размером $A \times B$ получены три взвешенные точки, принадлежащие трем фиксированным уровням окна: y_1, y_2, y_3 . Уровни должны быть разнесены на предельные расстояния (верх – середина – низ) с текущими координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$. Такое расположение окна соответствует «захвату» боковых дуг окружностей, когда окно вытянуто по оси ординат. В этом случае нет неоднозначности

по y , а усреднение точек осуществляется по x . Базовые параметры $\{a, b, R\}$ окружности, проходящей через данные точки, найдем, решая систему уравнений [5]:

$$\begin{aligned}x_1^2 - 2ax_1 + a^2 + y_1^2 - 2by_1 + b^2 &= R^2, \\x_2^2 - 2ax_2 + a^2 + y_2^2 - 2by_2 + b^2 &= R^2, \\x_3^2 - 2ax_3 + a^2 + y_3^2 - 2by_3 + b^2 &= R^2.\end{aligned}\tag{5}$$

Таким образом, организовав сканирование области окном, можно выделить имеющиеся боковые дуги окружности. Для выделения верхней и нижней дуг выбирается окно, вытянутое вдоль оси абсцисс. В этом случае усреднение выполняется по y , а уровни располагаются по оси абсцисс, что обеспечивает однозначность по x .

Вопросы оценки качества приближения могут быть решены, например, следующим образом. Для каждой текущей точки, принадлежащей окну сканирования, будем определять величины отклонений $(R - d_i)^2$ или $|R - d_i|$, где d_i – расстояние до центра найденной окружности с координатами (a, b) . Тогда критериями качества приближения могут, например, служить суммы $S = \sum_i (R - d_i)^2$, $S = \sum_i |R - d_i|$, $i = 1, \dots, m$ (m – число точек в окне).

Перечень используемых критериев можно легко расширить и разнообразить. Кроме того, целесообразно выставить дополнительные условия, задав, например, ограничения на представительство точек в сканирующем окне.

При реализации метода должно соблюдаться определенное соответствие между радиусом окружности и размерами окна. С одной стороны, окно должно иметь достаточную ширину и высоту для захвата представительного участка кривой. В то же время прямоугольник должен быть достаточно «тонким», чтобы в окно попадало как можно меньшее количество ложных точек. В проведенных экспериментальных исследованиях наилучшие результаты достигались при использовании окна с размерами $1/3R \leq A, B \leq 1/2R$. В зависимости от качества растровых изображений можно пытаться разнообразить способы определения взвешенных точек в окне, что не меняет сущности метода. Данный способ отличается простотой и дает неплохие практические результаты по выделению дуг окружностей на реальных фотографических изображениях.

Измерение параметров с использованием геометрических моделей. Решение задачи с использованием модельного подхода требует реализации следующих этапов:

- создание геометрических моделей исследуемого объекта;
- определение реальных характеристик объекта путем минимизации целевой функции отклонения параметров модели и параметров образа реального объекта.

Рассмотрим постановку задачи и самый общий подход к ее решению.

С видеоизображения движущегося объекта через определенные промежутки времени (время дискретизации) снимается кадр изображения в виде матрицы яркостей. Одновременно с этим формируется модельное изображение как результат соответствующего обобщенного проективного преобразования исходной геометрической модели, учитывающего характеристики системы технического зрения и установленные аффинные преобразования

(повороты, смещения, масштабирование). Задача параметрической идентификации заключается в отыскании для каждого кадра вектора параметров положения объекта, включая ориентацию, координаты центра масс и т. д., и сводится в данной постановке к поиску преобразующего оператора (преобразующей матрицы), воздействующего на модель и обеспечивающего наилучшую близость изображения модели и визуально наблюдаемого реального изображения.

Рассмотрим решение задачи в самом общем виде. Для каждого момента времени строится функция $W(p) = W(I, I_m(p))$, характеризующая степень близости реального изображения I и модельного $I_m(p)$ для заданного вектора параметров $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$. Далее производится поиск оптимальных значений параметров $p = p_0$, при которых функция имеет минимум. Найденные значения определяют положение объекта на текущий момент времени. В качестве целевой функции обычно выбирают среднеквадратическое отклонение точек пространства параметров объекта и модели. Для нахождения минимума целевой функции $W(p)$ может быть использован, например, в соответствии с рекомендациями работы [10] комбинированный алгоритм, включающий градиентный метод и метод Ньютона. Последовательность дискретных измерений позволяет определять параметры движения объекта по его изображению.

В реальных условиях параметры измеряются с некоторой погрешностью из-за наличия шумов, изменяющегося фона изображения и т. д. Сложность и точность решения зависят в значительной степени от выбора начального приближения параметров. Все эти особенности были учтены при проведении экспериментальных исследований и разработки реального алгоритма.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования проводились как для искусственно созданных объектов, так и для специальных приложений.

На примере мишени стыковочного узла станции «Мир» по телевизионным кадрам распознавались и определялись параметры цели, содержащей изображение круга и прямоугольника, на участке сближения менее 15 м. Проводился поиск дуг окружностей и отрезков линий, имеющих определенный наклон на кадрах, для чего выполнялись сканирование и обработка растрового изображения соответствующими окнами. Для обнаружения круга на подложке цели использовалось окно размером 15×20 , а для обнаружения линий прямоугольника – окно размером 9×9 пикселей. На рис. 1 показаны исходный (*a*), прошедший предварительную обработку (*b*) и результирующий кадры (*c*). В результате работы программ поиска по методу взвешенных точек распознаны круг (прорисован полностью) и две линии (выделены штрихами) с определенными углами наклона, а также выделены «ложные» отрезки линий. На другой серии (рис. 2, *a–c*) выделены три характерных отрезка прямых линий и две боковые дуги окружности. Здесь наблюдается искажение центрального круга и прямоугольника цели из-за наличия отличных от нуля пространственных ориентационных углов. Возможные ошибки измерений устраняются программными средствами и настройкой системы. Время обработки кадра в каждой серии составило несколько секунд на ПЭВМ стандартной конфигурации. Для обеспечения реального времени необходимо обрабатывать отдельный кадр примерно за одну секунду. Повышение быстродействия системы возможно за счет дальнейшей оптимизации структуры поисковых программ и использования более производительной техники, включая специализированные средства.

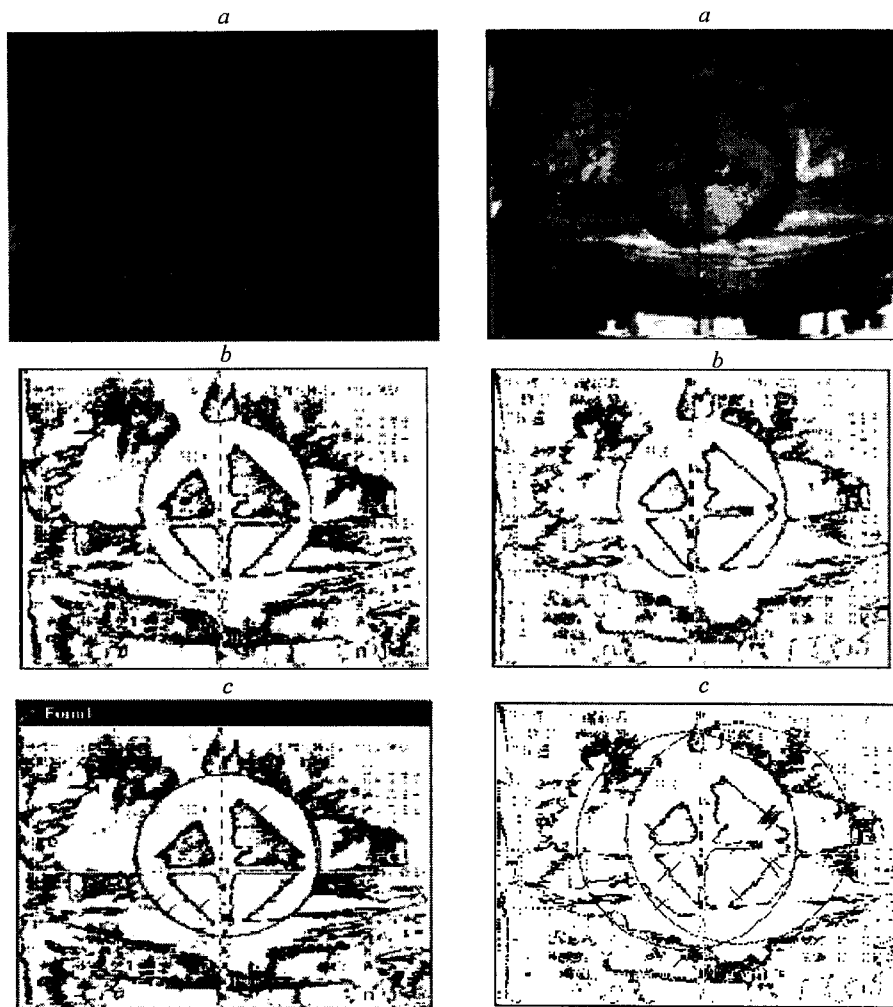


Рис. 1

Рис. 2

Для определения параметров с использованием моделирования построены плоская и пространственная геометрические модели стыковочного узла станции «Мир» и разработан корреляционный метод настройки модели на объект. Метод основан на поиске значений параметров, при которых модельное изображение объекта максимально совпадает с реальным. Необходимое условие: параметры объекта должны являться непрерывными функциями времени, при этом обеспечивается поток кадров изображений объекта. Мера близости двух изображений I_1 и I_2 , представленных матрицами яркостей, определяется корреляционным коэффициентом вида

$$\gamma(I_1, I_2) = - \sum_i \sum_j (I_1[i, j] - (kI_2[i, j] + b))^2, \quad (6)$$

где k и b – параметры линейного преобразования, обеспечивающие инвариантность коэффициента к линейному изменению яркости одного изображе-

ния относительно другого. Оптимальные параметры коэффициента (6), соответствующие наилучшему совпадению изображений, находим по методу наименьших квадратов:

$$\gamma(I_1, I_2) = g - 2kf - 2be + k^2d + 2kbc + b^2N,$$

$$\text{где } k = \frac{ce - fN}{c^2 - dN}; \quad b = \frac{cf - ed}{c^2 - dN}; \quad c = \sum_{i,j} I_2[i, j]; \quad d = \sum_{i,j} I_2^2[i, j]; \quad e = \sum_{i,j} I_1[i, j];$$

$$f = \sum_{i,j} I_1[i, j]I_2[i, j]; \quad g = \sum_{i,j} I_1^2[i, j]; \quad N - \text{размер области, по которой прово-}$$

дится сравнение изображений.

Функция близости $W(p)$ входного изображения I и изображения модели $I_m(p)$ записывается как $W(p) = -\gamma(I, I_m(p))$, $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$. Суть алгоритма состоит в реализации формулы $p = \arg \min_{p \in P} W(p)$, где P – область варьирования вектора параметров p .

Ограничимся в дальнейшем рассмотрением одномерной функции $w(x)$, где $x = p_k$, $p_k \in \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = \text{const}$ для $i \neq k$. Такое допущение вполне соотносится с практикой управления летательными аппаратами, когда требуемое положение достигается путем последовательного изменения параметров $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$. На рис. 3 представлен характерный вид функции $w(x)$. Особенностью функции является наличие множества участков, параллельных оси абсцисс (плато), и множества локальных экстремумов, что не позволяет эффективно применять численные алгоритмы поиска минимума [10], использующие производные функции первого и второго порядков. Плато возникают из-за дискретности изображения, а локальные экстремумы – из-за многочисленных шумов и особенностей самого объекта.

Для определения минимума такой функции использовался алгоритм, описываемый ниже. Идея алгоритма заключается в последовательном приближении к экстремуму и последующем сужении области, в которой находится экстремум. В данном случае осуществляется поиск минимума. Входными величинами являются начальное приближение решения x_0 , шаг h и точность определения параметра ε , $\varepsilon < h$.

Вначале рассмотрим унимодальную функцию $y = f(x)$. Выберем три точки (x_1, x_2, x_3) и соответствующие им значения функции (y_1, y_2, y_3) , причем $x_1 < x_2 < x_3$. Пусть также (x_m, y_m) – точка минимума, которую требуется

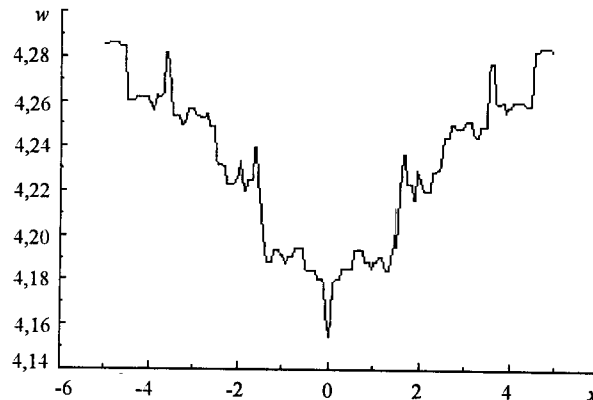


Рис. 3

найти. Выделим четыре интервала: $D_0 = (-\infty, x_1]$, $D_1 = [x_1, x_2]$, $D_2 = [x_2, x_3]$, $D_3 = [x_3, +\infty)$ – и введем в рассмотрение две величины: $d_1 = y_1 - y_2$ и $d_2 = y_2 - y_3$. Возможны следующие ситуации для значений d_1 , d_2 и координат текущей точки (x, y) :

1. Если $(d_1 > 0) \& (d_2 > 0)$, то:
 - а) $x_m \in D_2 \cup D_3$;
 - б) если $(x \in D_2) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_2$;
 - с) если $(x \in D_3) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_3$.
2. Если $(d_1 > 0) \& (d_2 = 0)$, то $x_m \in D_2$.
3. Если $(d_1 > 0) \& (d_2 < 0)$, то:
 - а) $x_m \in D_1 \cup D_2$;
 - б) если $(x \in D_1) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_1$;
 - с) если $(x \in D_2) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_2$.
4. Если $(d_1 = 0) \& (d_2 < 0)$, то $x_m \in D_1$.
5. Если $(d_1 < 0) \& (d_2 < 0)$, то:
 - а) $x_m \in D_0 \cup D_1$;
 - б) если $(x \in D_0) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_0$;
 - с) если $(x \in D_1) \& (y < y_k)$, то $x_m \in D_1$.
6. Если $(d_1 = 0) \& (d_2 = 0)$, то неопределенность.
7. Ситуация, когда $(d_1 < 0) \& (d_2 > 0)$, не возникает для унимодальных функций с минимумом. Для квазиунимодальной функции она сводится к ситуациям 2, 4 или 6 следующим образом:
 - а) если $y_1 > y_3$, то 4;
 - б) если $y_1 < y_3$, то 2;
 - с) если $y_1 = y_3$, то 6.

Соотношения «б», «с» должны выполняться для всех k , $k = (1, 2, 3)$.

Воспользуемся приведенными описаниями возможных ситуаций для построения алгоритма. Поиск глобального минимума проводится сканированием области допустимых значений аргумента x с переменным шагом h . В предположении параболической зависимости положения экстремума находится значение x_m и из текущей позиции осуществляется перемещение пробной точки в его направлении с текущим шагом h .

Основные шаги алгоритма имеют следующий вид:

- 1⁰ $x_1 := x_0 - h$, $x_2 := x_0$, $x_3 := x_0 + h$;
- 2⁰ вычисляем d_1, d_2 ;
- 3⁰ в соответствии с 1–7 находим интервал, которому принадлежит x_m ;
- 4⁰ если $x_m \in D_3$, то $x_1 := x_2$; $x_2 := x_3$; $x_3 := x_3 + h$;
 если $x_m \in D_2$, то $h := h/2$; $x_1 := x_2$; $x_2 := x_2 + h$;
 если $x_m \in D_1$, то $h := h/2$; $x_3 := x_2$; $x_2 := x_2 - h$;
 если $x_m \in D_0$, то $x_3 := x_2$; $x_2 := x_1$; $x_1 := x_1 - h$;
 если «неопределенность», то 6⁰;
- 5⁰ если $h > \epsilon$, то 2⁰; иначе 6⁰;
- 6⁰ $x_0 := x_2$.
- 7⁰ конец.

Алгоритм завершит свою работу только в том случае, если искомая точка находится в диапазоне $D_1 \cup D_2$, т. е. в диапазоне $[x_0 - h, x_0 + h]$. Если в начальный момент $x_m \notin [x_0 - h, x_0 + h]$, то количество шагов до ситуации, когда $x_m \in [x_0 - h, x_0 + h]$, не превышает $|x_0 - x_m|/h$. Если в начальный момент

$x_m \in [x_0 - h, x_0 + h]$, то количество шагов выполнения алгоритма не превышает величины $\log_2(|x_0 - x_m|/h)$.

Представим реальную одномерную функцию $w(x)$ в виде суперпозиции унимодальной функции $y = f(x)$ и шума. В этом случае рассмотренный алгоритм обладает способностью обходить локальные экстремумы функции $w(x)$, вызванные шумами. Вероятность ошибки определения глобального минимума возрастает с увеличением уровня шума, но проведенные экспериментальные исследования показали, что алгоритм надежно работает при уровне шумов, характерном для рассматриваемого приложения (см. рис. 3).

Рассогласование модельного и реального изображений, в том числе и в начальный момент времени, должно лежать в пределах, определяемых особенностями функции $W(p)$. В постановке реальной задачи предусматривалась возможность согласования положений объекта и модели в начальный момент проведения эксперимента. Как показывают практические исследования, в этом случае обеспечивается надежный «захват» цели и модель «отслеживает» динамику объекта в реальном времени с заданной точностью. Для грубого начального определения взаимного положения изображений целесообразно использовать алгоритм, описанный в работе [3].

Рассмотренная задача имеет определенные особенности. Одна из них связана с тем, что изображение объекта характеризуется нестабильным уровнем яркости и зависит от расположения источников света. Для решения задачи выделения объекта из фона в работе [11] предложен способ его компенсации, который предполагает заполнение фоновых элементов матрицы модельного изображения средним значением фона. Его получают усреднением яркости по всем точкам, не принадлежащим объекту. Для преодоления локальных помех, вызванных, например, наличием теней, предлагается воспользоваться частными корреляциями, механизм которых также описан в работе [11].

Для проверки алгоритма был создан программный исследовательский прототип измерительной системы, иллюстрирующий работу модельного метода определения параметров относительного движения применительно к образу станции «Мир». Метод использует 2D- и 3D-модели цели на различ-

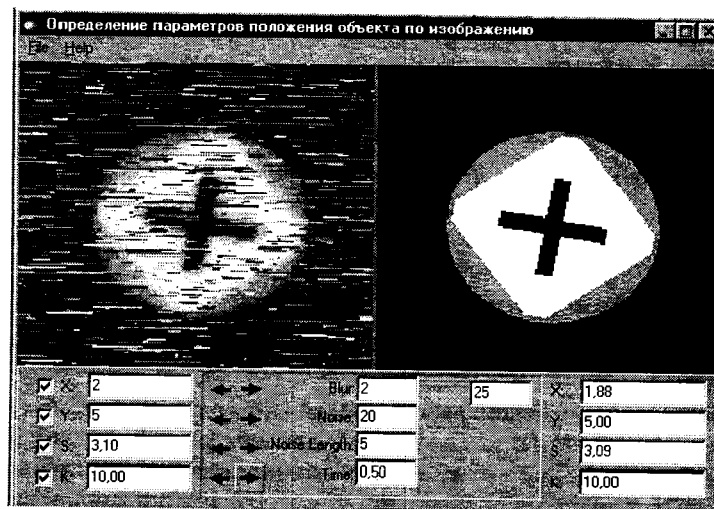


Рис. 4

ных участках маневрирования. Он позволяет надежно определять скоростные и пространственные характеристики объекта в широком диапазоне шумов, причем для измерения параметров может оказаться достаточным наличие только участка изображения цели. На рис. 4 показан фрагмент работы программной системы для плоского случая.

Заключение. В настоящей работе предложены и исследованы алгоритмы для выделения и измерения графических примитивов на растровых изображениях. Показаны условия, при которых данные алгоритмы являются эффективными, и их ограничения. Рассмотрена возможность использования предлагаемых методов для работы с растровыми изображениями реальных подвижных объектов. В частности, выполнен поиск характерных образов стыковочного узла в виде дуг окружностей и отрезков прямых линий с одновременным определением размеров и углов наклона. В качестве альтернативного рассмотрен метод определения параметров, использующий геометрические модели объекта. Измерительная система, построенная по этому принципу, имеет следующие достоинства: высокую устойчивость к шумам; возможность работы при усечении изображения более чем на 50 %; высокое быстродействие, достигаемое на обычных ПЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976.
2. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986.
3. Лагиева М. М., Хачумов В. М., Шабалов Д. В. Метод построения линий положения для идентификации полутоновых изображений // Автометрия. 1991. № 6. С. 7.
4. Колесников А. Н., Белехов В. В., Чаленко И. О. Автоматическое преобразование растровых изображений в векторный формат в цифровой картографии // Науч. сессия-96: Тез. докл. Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 1996.
5. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир, 1977.
6. Мацелло В. В. Структурный метод описания и распознавания векторизованных изображений // Теоретические и прикладные вопросы распознавания изображений: Сб. науч. тр. /Науч. совет НАН Украины по проблеме «Кибернетика». Киев, 1995. С. 52.
7. Кийко В. М. Распознавание объектов на чертежно-графических изображениях // Там же. С. 69.
8. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
9. Алибеков А. Г., Лагиева М. М., Хачумов В. М. Определение ориентации трехмерных графических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. 38, № 3–4. С. 35.
10. Барладян Б. Х., Галактионов В. А., Зуева Е. Ю., Кугушев Е. И. Параметрические модели трехмерных объектов и их использование для реконструкции сцен // Открытые системы. 1995. № 5. С. 49.
11. Грибов М. Г. Распознавание и определение параметров 3D-объектов // Третья международная школа-семинар по искусственному интеллекту для студентов и аспирантов (Брасславская школа-1999): Сб. науч. тр. Минск: БГУИР, 1999. С. 107.

*Институт программных систем РАН,
E-mail: vmh@vmh.botik.ru*

*Поступила в редакцию
16 августа 1999 г.*