

# КОРРЕКТИРОВКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ОКРАСОЧНОГО РОБОТА СРЕДСТВАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Д.Б. Жмуров, С.В. Моренов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)(СГАУ), Самара, Россия

В настоящей работе предлагается способ динамической корректировки алгоритма окраски, основанной на анализе фактического расположения объекта средствами технического зрения. Задача корректировки алгоритма работы окрасочного робота заключается во внесении корректур в координаты опорных точек математической модели объекта, заложенной в память робота. Для определения корректур строится аффинное преобразование указанных координат в координаты фактической модели расположения объекта. Параметры аффинного преобразования вычисляются по данным системы технического зрения предложенной конфигурации.

**Ключевые слова:** система технического зрения, аффинное преобразование.

## Введение

Широкое применение промышленных роботов на участках окраски в современном автоматизированном производстве обусловлено не только высокой точностью и стабильностью позиционирования окрасочного оборудования но и гибкостью настройки на конкретный тип объекта окраски.

Разработка алгоритма окраски заключается в построении математической модели, описывающей расположение окрашиваемого объекта в пространстве и его конфигурацию. Расхождение между указанной моделью и фактическим расположением объекта является одним из основных факторов, снижающих качество окраски.

Одним из способов уменьшения погрешности позиционирования объекта традиционно является применение вспомогательных механических оснасток и фиксаторов, с помощью которых объект закрепляется в заданном положении. Однако данный способ затрудняет подготовку производства, поскольку требует затрат на разработку и внедрение специализированных оснасток под каждый тип окрашиваемого объекта.

В настоящей работе предлагается способ динамической корректировки алгоритма окраски, основанной на анализе фактического расположения объекта средствами технического зрения. Преимуществом данного способа является универсальность его применения к различным объектам заданного класса без необходимости корректировки положения объекта с помощью механических средств.

## Постановка задачи

В системах машинного зрения обычно используются различные оптические системы получения изображения объекта [1,2]. Для построения корректирующей функции достаточно бинарного изображения объекта, которое может быть получено с помощью изме-

рительной световой завесы [3] или оптического датчика[4,5], работающего в сканирующем режиме.

В используемой математической модели конфигурация объекта представляется набором геометрических примитивов (прямая, дуга), которые соответствуют командам языка программирования перемещения робота. В общем виде команду можно представить в виде  $f([x, y], [p])$ , где  $[x, y]$  – массив опорных точек,  $[p]$  – параметры примитива,  $f$  – функция вычисления промежуточных точек в соответствии с заданным типом примитива. В рассматриваемой задаче отклонение объекта от заданного положения заключается в смещении опорных точек и не влияет на другие параметры примитивов, т.к. объект не изменяет размера и формы. Поэтому параметры  $[p]$  можно опустить и в дальнейшем алгоритм окраски будем рассматривать как последовательность команд вида  $f([x, y])$ .

Задача корректировки алгоритма работы окрасочного робота заключается во внесении корректур в координаты  $f([x, y])$ . Для определения скорректированных опорных точек  $f([x', y'])$  необходимо построить аффинное преобразование координат опорных точек в координаты фактической модели расположения объекта.

### Конфигурация системы технического зрения

Сканирование объекта осуществляется с помощью двух лазерных датчиков. Чувствительный элемент датчика  $D_1$  направлен вдоль полотна конвейера, перпендикулярно вектору его движения. Чувствительный элемент датчика  $D_2$  направлен по нормали к полотну конвейера. Датчик  $D_2$  закреплен на механической конструкции, позволяющей выполнять возвратно-поступательные перемещения перпендикулярно вектору движения конвейера (рис.1).

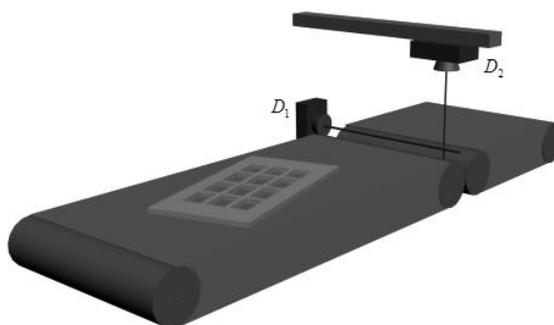


Рис. 1. Расположение оптических датчиков

Датчики имеют выходы релейного типа. При обнаружении отраженного от объекта луча выход замыкается, что соответствует логической единице получаемого бинарного изображения.

Конвейер и датчик  $D_2$  приводятся в движение с помощью шаговых двигателей, что определяет дискретный режим работы системы технического зрения.

## Решение задачи

Введём следующие обозначения.

Пусть  $A$  это расположение объекта в пространстве, которое полностью соответствует математической модели, описанной алгоритмом работы окрасочного робота. Тогда  $A'$  это произвольное расположение объекта, полученное смещением и поворотом относительно  $A$ .

Введём систему координат  $OXY$ , приняв за  $O$  точку на краю полотна конвейера, находящуюся на фиксированном расстоянии до камеры обработки. Ось  $Y$  направлена вдоль вектора движения конвейера, ось  $X$  – поперёк.  $w$  и  $h$  - ширина и высота объекта.

Для однозначного позиционирования  $A'$  необходимо вычислить матрицу преобразования:

$$\theta = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ r_c^x & r_c^y & 1 \end{bmatrix},$$

где  $a$  - угол наклона объекта к оси движения конвейера,  $r_c$  - вектор от центра идеального положения объекта до его фактического центра (рис.2).

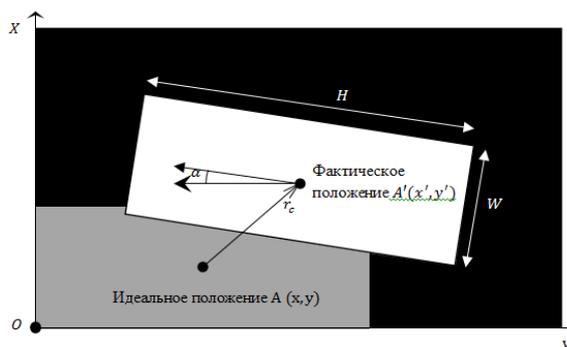


Рис. 2. Схема постановки задачи

Результатом работы  $D_1$  является дискретный прямоугольный импульс  $f(x)$  продолжительностью  $n$  тактов, носитель которого  $[t_1, t_n]$  задает границы объекта по оси  $Y$ . В этих пределах осуществляется движение датчика  $D_2$ , совершающего  $n/m$  проходов над объектом, где  $m$  - количество тактов по оси  $Y$ , соответствующих одному проходу. Датчик  $D_2$  формирует бинарный массив  $K$ , строки которого соответствуют номеру прохода, а столбцы – шагам во время прохода.

Рассмотрим случай  $m=1$ , в котором каждый проход датчика  $D_2$  производится за один такт конвейера, формируя неискаженный образ объекта (рис.3).

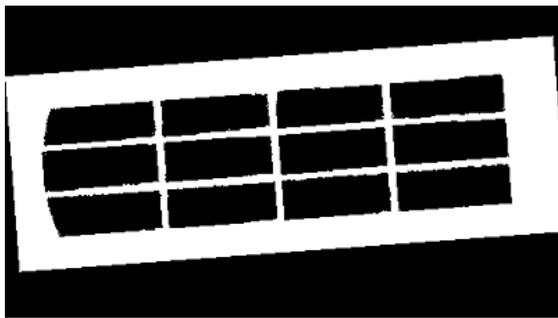


Рис.3. Образ объекта, сформированный датчиком

Выделяем из  $K$  набор точек  $\{L_k\}_{k=1}^n$ , образующих нижнюю границу объекта  $l$ :

$$L_k = (\{\min(x) \mid K(x, k) > 0\}, k), k = \overline{1, n}$$

Вычисляем оптимальные коэффициенты направляющей нижней границы минимизацией среднеквадратичного отклонения точек  $\{L_k\}_{k=1}^n$  от прямой  $k_p k_q$ :

$$\sigma(p, q) = \min_{\substack{p=1, n \\ q=1, n \\ k_p \neq k_q}} \sigma_{k_p k_q} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(L_{k_q}^y - L_{k_p}^y)L_i^x + (L_{k_p}^x - L_{k_q}^x)L_i^y + L_{k_q}^x L_{k_p}^y - L_{k_p}^x L_{k_q}^y}{\sqrt{(L_{k_q}^y - L_{k_p}^y)^2 + (L_{k_p}^x - L_{k_q}^x)^2}} \right)^2}$$

Отсюда угол наклона нижней границы:  $a_l = -\text{sign}(\alpha) \cdot (\pi / 2 - |\alpha|)$ , где  $\alpha = \arctan \frac{(L_{k_q}^y - L_{k_p}^y)}{(L_{k_p}^x - L_{k_q}^x)}$

. Аналогично найдём угол наклона  $a_r$  верхней границы объекта  $r$ . Тогда угол наклона

$$\text{объекта } a = \frac{a_l + a_r}{2}$$

Вычислим параметры сдвига объекта от идеального положения. Для этого найдём точки пересечения границ объекта  $l$  и  $r$  с границами  $g_1$  и  $g_2$  массива  $K$ :  $A_1 = l \cap g_1, A_2 = r \cap g_2$

Середина отрезка  $A_1 A_2$  соответствует фактическому центру объекта. Отсюда координаты вектора  $r_c = (A_c^x - w/2, A_c^y - h/2)$ .

Таким образом, для корректировки координат опорных точек алгоритма построено преобразование:

$$\theta: (x', y') = \begin{bmatrix} x + r_c^x & y + r_c^y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{bmatrix}$$

Проиллюстрируем работу построенного преобразования на примере. Пусть в ходе алгоритма окраски робот движется по прямой линии, определяемой функцией  $f_{II}(x_1, y_1, x_2, y_2)$ , вдоль границы объекта (рис.4). Подставив координаты опорных точек в  $\theta$ , получим скорректированные точки  $(x_1', y_1')$  и  $(x_2', y_2')$ , соответствующие фактическому расположению объекта (рис.4), которые будут подставлены в алгоритм вместо  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ . Аналогично преобразование  $\theta$  применяется к остальным опорным точкам алгоритма окраски, в результате чего добиваемся их соответствия фактическому расположению объекта.

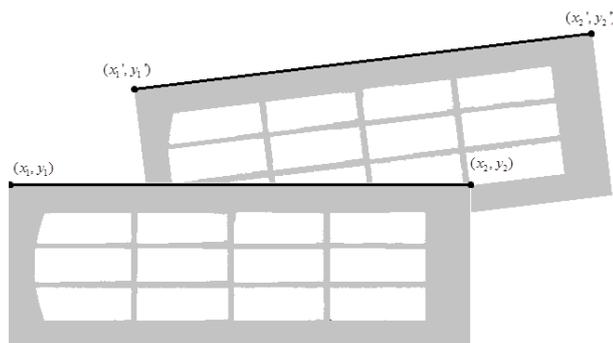


Рис.4. Преобразование координат опорных точек

## Заключение

Полученное в данной работе преобразование координат опорных точек математической модели объекта позволяет вычислить скорректированные координаты опорных точек алгоритма работы окрасочного робота. Это позволяет компенсировать расхождение между математической моделью, заложенной в память робота на этапе подготовки производства и фактическим расположением объекта, без использования механических приспособлений корректировки положения объекта. Описанный в настоящей работе способ смоделирован в системе Matlab и показал свою работоспособность.

## Литература

1. Техническое зрение роботов / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков; под ред. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
2. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
3. Обзор измерительных и дискретных световых завес компании Leuze electronic [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.leuze-electronic.ru/products\\_de8.html](http://www.leuze-electronic.ru/products_de8.html) (дата обращения 1.04.2016).
4. Обзор фотоэлектрических датчиков компании Sick Sensor Intelligence [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sick.com/de/en/product-portfolio/photoelectric-sensors/photoelectric-sensors/c/g172752xp2> (дата обращения 1.04.2016).
5. Обзор фотоэлектрических датчиков компании Autonics [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.autonics.ru/products/products\\_detail.php?catecode=01/02/02&db\\_uid=1684](http://www.autonics.ru/products/products_detail.php?catecode=01/02/02&db_uid=1684) (дата обращения 1.04.2016).