УДК 623.451.8

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТЕЛЕКАМЕРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЗАРЯЖАНИЯ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ РАКЕТАМИ

Г.М. Муратшин, Л.И. Ситников

DIGITAL CAMERA APPLICATIONS FOR AUTOMATION OF LAUNCHERS LOADING

G.M. Muratshin, L.I. Sitnikov

Обеспечение надежного безударного заряжания пусковой установки ракетами за минимальное время требует автоматизации этого процесса. Предложена математическая модель, позволяющая вырабатывать с помощью компьютера и телекамеры необходимые для этого управляющие воздействия.

Ключевые слова: телекамера, заряжание, пусковая установка, автоматизация.

Provision of reliable and non-impact launcher loading in the minimum time is required to automate this process. The paper proposes a mathematical model to produce a control to computer and cameras needed for this action.

Keywords: digital camera, loading, launcher, automation.

Введение

Сокращение времени цикла заряжания является актуальной проблемой, особенно для зенитных ракетных комплексов (ЗРК) ближней дальности. В условиях, когда скорости выполнения силовых операций цикла (подъем, поворот, опускание груза) для достижения этой цели максимально увеличены, дальнейшее повышение быстродействия возможно за счет сокращения времени управления. При осуществлении управления оператором процесс не оптимален, производится многократное включение – выключение исполнительных органов при стыковке ракеты с приёмными элементами пусковой установки (ПУ), что приводит к существенному увеличению времени цикла. Кроме того, не исключена возможность повреждения элементов ракеты и ПУ при ошибочных воздействиях на органы управления и несогласованных действиях расчета в условиях напряженной боевой обстановки.

1. Постановка задачи

Для автоматизации процесса заряжания ПУ необходимо иметь информацию об относительном положении ракеты (контейнера) и ПУ. Воспользуемся для этой цели цифровой телекамерой.

На чувствительном элементе телекамеры получается перспективное изображение. В нашем случае может быть получено перспективное изображение контейнера. У нас имеется полная информация о геометрии контейнера.

На основании информации о геометрии контейнера и его перспективного изображения требуется определить положение локальной системы координат контейнера относительно системы координат телекамеры.

Теоретическое обоснование применения геометрических преобразований с помощью однородных координат изложено в [1] и [2]. Возможности применения оптических систем изложены в [3].

2. Геометрические преобразования с применением однородных координат

В однородных координатах точка представляется в виде четырехмерного вектора строки:

$$x = (\omega x_1, \omega x_2, \omega x_3, \omega),$$

где x_1, x_2, x_3 – координаты точки в трехмерной прямоугольной декартовой системе координат; $\omega \neq 0$ – произвольное число.

Муратшин Геннадий Михайлович – канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «НПП «СТАРТ», г. Екатеринбург; nppstart@nexcom.ru

Ситников Леонид Иванович – инженер ОАО «НПП «СТАРТ», г. Екатеринбург; nppstart@nexcom.ru

Muratshin Gennady Mihailovich – PhD, director of OSC «SPC «START», Yekaterinburg; nppstart@nexcom.ru

Sitnikov Leonid Ivanovich – engineer of OSC «SPC «START», Yekaterinburg; nppstart@nexcom.ru

2.1. Преобразование точки

Координаты точки преобразуются при помощи матрицы преобразований в другую систему координат:

$\bar{x} = xH$,

где H – матрица преобразования; $\bar{x}$ – точка в новой системе координат; x – точка в старой системе координат.

2.2. Элементарные матрицы преобразований

2.2.1. Перенос (сдвиг) системы координат относительно другой системы координат

Перенос локальной системы координат относительно глобальной системы координат на величину q_1 по координате x_1 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ q_1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Перенос локальной системы координат относительно глобальной системы координат на величину q_2 по координате x_2 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Перенос локальной системы координат относительно глобальной системы координат на величину q_3 по координате x_3 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.2.2. Поворот системы координат относительно другой системы координат

Поворот локальной системы координат относительно глобальной системы координат вокруг оси x_1 на угол q_4 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_4) & -\sin(q_4) & 0 \\ 0 & \sin(q_4) & \cos(q_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Поворот локальной системы координат относительно глобальной системы координат вокруг оси x_2 на угол q_5 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^5 = \begin{pmatrix} \cos(q_5) & 0 & \sin(q_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_5) & 0 & \cos(q_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Поворот локальной системы координат относительно глобальной системы координат вокруг оси x_3 на угол q_6 осуществляется матрицей преобразований:

$$G^6 = \begin{pmatrix} \cos(q_6) & -\sin(q_6) & 0 & 0 \\ \sin(q_6) & \cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.2.3. Центральное проецирование

Имеем точку $x = (x_1, x_2, x_3, 1)$. Тогда проекция этой точки $\bar{x} = (hx_1, hx_2, hx_3, h) = xC$ от точечного источника $s = (s_x, s_y, s_z)$ осуществляется матрицей проецирования C.

Матрица проецирования на профильную координатную плоскость:

$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & -c_y & -c_z & -c_p \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$c_y = \frac{s_y}{s_x},\ c_z = \frac{s_z}{s_x},\ c_p = \frac{1}{s_x}.$$

Матрица проецирования на горизонтальную координатную плоскость:

$$C_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -c_x & 0 & -c_z & -c_h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$c_x = \frac{s_x}{s_y},\ c_z = \frac{s_z}{s_y},\ c_h = \frac{1}{s_y}.$$

Матрица проецирования на фронтальную координатную плоскость:

$$C_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c_x & -c_y & 0 & -c_f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$c_x = \frac{s_x}{s_z},\ c_y = \frac{s_y}{s_z},\ c_f = \frac{1}{s_z}.$$

2.2.4. Частные производные элементарных матриц преобразований

$$\frac{\partial}{\partial q_1} G^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2}G^2=\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&1&0&0\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_3}G^3=\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&1&0\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_4}G^4=\begin{pmatrix}0&0&0&0\\0&-\sin(q_4)&-\cos(q_4)&0\\0&\cos(q_4)&-\sin(q_4)&0\\0&0&0&0\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_5}G^5=\begin{pmatrix}-\sin(q_5)&0&\cos(q_5)&0\\0&0&0&0\\-\cos(q_5)&0&-\sin(q_5)&0\\0&0&0&0\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial q_6}G^6=\begin{pmatrix}-\sin(q_6)&-\cos(q_6)&0&0\\\cos(q_6)&-\sin(q_6)&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix}.$$

2.3. Система преобразований

Примем систему преобразований точки – совместим начало локальной системы координат с началом глобальной системы координат, также совместим одноименные оси. Сначала повернем локальную систему координат относительно глобальной вокруг каждой из осей, затем осуществим перемещения начала координат локальной системы относительно глобальной, потом проведем преобразование проецирования. Такой выбор системы преобразований удобен тем, что не страдает наглядность преобразований. Если сначала осуществить перемещения, а затем повороты, то при повороте относительно оси глобальной системы координат начало координат локальной системы будет перемещаться по дуге окружности и наглядное представление осложняется:

$$\bar{x}=xH,$$

где H – матрица преобразований,

$$H=G^6(q_6)G^5(q_5)G^4(q_4)G^3(q_3)G^2(q_2)G^1(q_1)C.$$

3. Система уравнений для определения положения контейнера

Введем локальную систему координат, связанную с контейнером. Введем систему координат, связанную с телекамерой, будем считать ее глобальной системой координат. На контейнере выберем три характерные точки, не лежащие на одной прямой, координаты которых в локальной системе координат контейнера нам известны. Считаем, что с помощью цифровой телекамеры мы можем получить координаты проекций этих точек на плоскость проекции, связанной с телекамерой в некотором масштабе.

Систему координат, связанную с телекамерой, выберем так, чтобы ось z (x_3) совместилась с оптической осью телекамеры, ось y (x_2) направим вверх, ось x (x_1) в сторону. Тогда считаем, что телекамера получает на картинной плоскости фронтальную проекцию $\bar{x}^j$, $j=1,2,3$ характерных точек в некотором масштабе.

В однородных координатах проекции точек будут иметь вид

$$\bar{x}^j=\left(\omega^j\bar{x}_1^j m,\omega^j\bar{x}_2^j m,0,\omega^j\right),$$

где m – масштабный множитель, переводящий единицу расстояния на цифровой матрице в метры; $\bar{x}_i^j$ – координаты проекции точки на картинной плоскости; j – номер точки.

Координаты точки зрения (центра проекции) в системе координат телекамеры определяются так:

$$s=\left(0,0,s_z\right),$$

где s_z – характеристика телекамеры – расстояние от плоскости объектива до картинной плоскости (светочувствительной цифровой матрицы).

Рассмотрим матрицу преобразований:

$$H=G^6(q_6)G^5(q_5)G^4(q_4)G^3(q_3)G^2(q_2)G^1(q_1)C_p.$$

Тогда проекции точек будут иметь вид

$$\bar{x}^j=x^jH,$$

где x^j – точки в локальной системе координат контейнера.

Или в координатной форме

$$\bar{x}_i^j=x_r^jh_{ri}, \tag{1}$$

где

$$h_{k_1k_8}=\left(\prod_{i=1}^{6}g_{k_ik_{i+1}}^{7-i}\left(q_{7-i}\right)\right)c_{k_7k_8}.$$

Производная матрицы h по координате r будет иметь вид

$$h_{k_1k_8}^r=\left(\prod_{i=1}^{6}g_{k_ik_{i+1}}^{7-i,\delta_{(7-i)r}}\left(q_{7-i}\right)\right)c_{k_7k_8},$$

где

$$\delta_{ij}=\begin{cases}1, & \text{если}\quad i=j\\0, & \text{если}\quad i\neq j\end{cases}\ \text{– символ Кронеккера.}$$

Таким образом, имеем систему (1) 9 нелинейных алгебраических уравнений относительно 9 неизвестных q_i,ω_j, $i=1,\ldots,6$, $j=1,2,4$.

Систему этих нелинейных алгебраических уравнений можно решить численно, например, методом Ньютона. Получившиеся q_i и являются искомыми величинами, определяющими положение локальной системы координат относительно системы координат телекамеры (глобальной системы координат).

4. Решение системы уравнений методом Ньютона

4.1. Схема метода Ньютона

Имеется система нелинейных алгебраических уравнений:

$$f_i(x_j) = 0, \quad i, j = 1, \ldots, n.$$

Представим x_j в виде

$$x_j = x_j^0 + \Delta x_j,$$

где x_j^0 – начальное приближение; Δx_j – поправка к решению.

Тогда для поправки к решению Δx_j имеем систему линейных уравнений:

$$a_i^j \Delta x_j = -f_i,$$

где $a_i^j = \partial f_i / \partial x_j$.

Решаем систему линейных уравнений относительно Δx_j, вычисляем новые значения x_j и повторяем вычисления до достижения заданной точности.

Считается, что решение получено, если норма вектора поправки меньше некоторой заданной величины и количество итераций не превысило заданного максимального значения.

4.2. Система линейных уравнений метода Ньютона

Составим для нашего случая систему линейных уравнений метода Ньютона:

$a_i^j \Delta q_j = b_i, \quad i, j = 1, \ldots, 9,$ где по повторяющемуся индексу ведется суммирование.

В системе нелинейных уравнений (1) q и ω является искомыми параметрами.

Введем обозначения:

$$q_{6+i} = \omega_i, \; i = 1, \ldots, 3.$$

Тогда система уравнений (1) будет

$$\overline{x}_i^j - x_r^j h_{ri} = 0, \; j = 1, 2, 3, \; i = 1, 2, 4,$$

где $\overline{x}^j = \left(q_{6+j}\overline{x}_1^j m, q_{6+j}\overline{x}_2^j m, 0, q_{6+j}\right)$ – здесь суммирование по повторяющемуся индексу не ведется, $j = 1, \ldots, 3$.

Вычислим коэффициенты матрицы a.

$$a_{st} = \begin{cases} -x_r^j h_{ri}^t, i = 1, 2, \; j = 1, 2, 3, \; s = i + 2(j-1), \; t = 1, \ldots, 6; \\ -x_r^j h_{ri}^t, i = 4, \quad j = 1, 2, 3, \; s = 6 + j, \qquad t = 1, \ldots, 6; \\ m x_i^j, \quad i = 1, 2, \; j = 1, 2, 3, \; s = i + 2(j-1), \; t = 7, 8; \\ 1, \qquad i = 4, \quad j = 1, 2, 3, \; s = 6 + j, \qquad t = 9; \\ 0, \quad \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Вычислим вектор b.

$$b_s = \begin{cases} -(\overline{x}_i^j - x_r^j h_{ri}), \; i = 1, 2, \; j = 1, 2, 3, \; s = i + 2(j-1); \\ -(\overline{x}_i^j - x_r^j h_{ri}), \; i = 4, \quad j = 1, 2, 3, \; s = 6 + j. \end{cases}$$

4.3. Начальное приближение

Метод Ньютона требует начального приближения к решению. При этом начальное приближение должно быть достаточно точным. Теория не дает ответа о точности начального приближения и тем более никак не помогает его выбрать.

Здравый смысл подсказывает, что как транспортная машина, так и ПУ располагаются относительно заряжающей машины определенным образом. При этом в каждом конкретном случае отклонения от некоторого среднего положения невелики. В качестве начального приближения для метода Ньютона следует принимать такое среднее положение.

Заключение

Предлагаемая математическая модель позволяет при соответствующей компьютерной базе определить положение контейнера относительно системы координат цифровой телекамеры. Аналогичным образом одновременно может быть определено положение ПУ относительно системы координат телекамеры. И, следовательно, определяется положение контейнера относительно ПУ. На основании этих данных можно выработать управляющие воздействия на привод заряжающей машины для заряжания ПУ. Привод заряжающей машины также должен иметь цифровое управление. Заряжающая машина, работающая по этому принципу, в состоянии обеспечить заряжание ПУ без вмешательства оператора.

Литература

1. *Никулин, Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е.А. Никулин. – СПб.:БХВ-Петербург, 2005.*

2. *Гилой, В. Интерактивная машинная графика / В. Гилой. – М.: Мир, 1981.*

3. *Сакин, И.Л. Инженерная оптика / И.Л. Сакин. – Л.: Машиностроение, 1976.*

Поступила в редакцию 12 октября 2010 г.