

УДК 514.11: 514.12: 681.772.7

Н.С. Абрамов, В.А. Ромакин

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТНОЙ ВИДЕОКАМЕРОЙ*

Статья посвящена разработке методов управления поворотной видеокамерой с двумя степенями свободы для решения задачи перенацеливания в заданную точку поверхности. Целью работы является построение математической модели поворотной камеры и экспериментальная проверка качества программной реализации управления на ее основе в составе системы технического зрения (СТЗ). Цель достигается созданием аппаратной платформы и разработкой специализированного программного обеспечения СТЗ. Проведенное тестирование показало достаточную адекватность математической модели и ее пригодность для практического использования в задаче управления поворотной видеокамерой.

Система технического зрения; управляемая камера; перенацеливание; математическая модель; аппаратная платформа; программное обеспечение.

N.S. Abramov, V.A. Romakin

METHODS OF CONTROL OF ROTATING VIDEO CAMERA

The paper is devoted to developing the methods of control of rotating video camera with two degrees of freedom in computer vision system for retargeting the camera on a given point of observed surface. The purpose of the paper is to construct a mathematical model of rotating video camera and test its software realization on a computer vision system. The purpose is achieved by development of mathematical and algorithmic framework, creation a hardware platform and software of the computer vision system. Testing and researching showed suitability of developed model for applications that use computer vision systems.

Computer vision system; controlled camera; retargeting; mathematical model; hardware platform; software.

Введение. В настоящее время наблюдается рост числа применений и расширение области приложения систем технического зрения (СТЗ), совмещенных с программными системами специального назначения. С помощью таких систем решается ряд сложных задач: определение местоположения и ориентации системы наблюдения; поиск и распознавание целевых объектов; слежение за динамическими целями и др. Указанные задачи требуют выработки соответствующего управления, которое может быть как ручным, так и автоматическим.

Задача перенацеливания видеокамеры решается, как правило, в поисковых, охранных или военных системах. Так, в работе [1] рассматривается комплекс из нескольких взаимосвязанных поворотных камер и одной стационарной камеры. Для управления поворотными камерами используется известная скорость объекта слежения и его координаты на плоскости наблюдения. В работе [2] вводится полярная система координат, привязанная к камере, и вычисляются углы наведения камеры на объект, угловые скорости которого известны.

В работе предлагается СТЗ, которая состоит из одной поворотной камеры, а система управления может вычислять углы поворота камеры для наведения на цель в пространстве. Преимущество предлагаемого подхода к построению СТЗ в том, что уменьшается количество аппаратного обеспечения и требующаяся для его работы вычислительная мощность, соответственно увеличивается вес полезной

* Работа выполнена при поддержке проекта № 2.10 по программе фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация» и проектов РФФИ № 12-07-00205а, № 13-01-90602 Арм_a.

нагрузки. Цель настоящей работы — создание математической модели перенацеливания поворотных камер определенного класса и экспериментальная проверка ее адекватности на простой физической модели.

1. Постановка задачи. Для наблюдения за распознанным целевым объектом на заданном участке местности необходимо выработать соответствующие управления поворотной камерой так, чтобы в каждый текущий момент времени камера была направлена в сторону целевого объекта, например в его «центр».

В настоящей работе рассматриваются поворотные видеокамеры с двумя степенями свободы, которые устроены следующим образом: камера крепится на одном приводе (привод 1), который в свою очередь крепится на другом приводе (привод 2); камера установлена на приводе 1 таким образом, что оптическая ось ее объектива пересекает ось вращения этого привода и перпендикулярна ей; оси вращения приводов взаимно перпендикулярны. Примем, что привод 1 предназначен для вращения камеры по азимуту («влево-вправо»), а привод 2 — для вращения камеры по склонению («вверх-вниз»).

При работе с поворотной камерой при помощи команд можно изменять направление объектива, вращая камеру вокруг осей двух приводов. Команды выглядят следующим образом: *повернуть привод i на угол A_i* . Требуется решить задачу перенацеливания камеры на неподвижный объект с известными координатами (x, y) на поверхности наблюдения, то есть, найти такие углы (α, β) поворота приводов, которые переведут вектор наблюдения на точку (x, y) .

2. Перенацеливание на заданную точку поверхности. Далее будем считать, что наблюдаемая поверхность представляет собой плоскость. Обозначим оси вращения первого и второго приводов через l_1 и l_2 соответственно, а расстояние между ними через h ($h > 0$). Положим, что вращение камеры, если рассматривать его по направлению оси вращения, осуществляется по часовой стрелке вокруг оси l_1 и против часовой стрелки — вокруг оси l_2 .

Зафиксируем начальное положение камеры таким образом, чтобы она была расположена (под расположением камеры будем понимать точку пересечения оптической оси объектива камеры и оси вращения первого привода) на известном расстоянии H ($H > h$) от плоскости наблюдения и направлена перпендикулярно к ней, а оси l_1 и l_2 были параллельны этой плоскости.

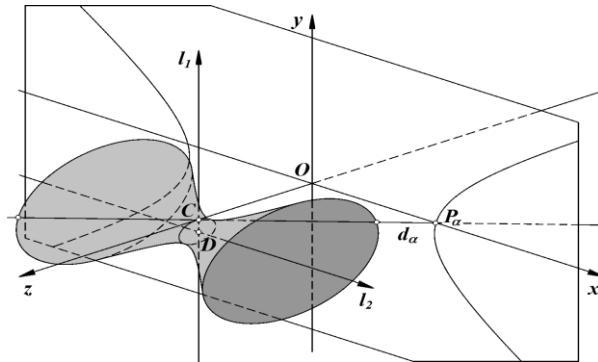
Выберем декартову прямоугольную систему координат так, чтобы в начальном положении камера располагалась на оси Oz в точке $C = (0, 0, H)$ и была направлена в начало координат (плоскость наблюдения при этом совпадает с плоскостью Oxy), а оси Ox и Oy были сонаправлены осям l_2 и l_1 соответственно.

2.1 Перенацеливание камеры из начального положения. Пусть требуется направить камеру, находящуюся в начальном положении, на некоторую точку $P_0 = (x_0, y_0, 0)$, расположенную на плоскости Oxy . Для этого необходимо повернуть камеру сначала вокруг оси l_1 на некоторый угол α_0 ($|\alpha_0| < \pi/2$), а затем — вокруг оси l_2 на угол β_0 ($|\beta_0| < \pi/2$). Вычислим углы поворота α_0 и β_0 .

Повернем камеру из начального положения вокруг оси l_1 на некоторый угол α ($|\alpha| < \pi/2$) и обозначим оптическую ось объектива камеры через d_α . Если зафиксировать угол α и вращать камеру вокруг оси l_2 , то прямая d_α будет вращаться вокруг оси l_2 , вычерчивая в пространстве однополостный гиперболоид вращения (рис. 1) [3, 4].

Запишем уравнение однополостного гиперболоида вращения, учитывая, что его осью вращения является ось l_2 , параллельная оси Ox , центр симметрии гиперболоида расположен в точке $D = (0, -h, H)$, а сечение плоскостью Oyz представляет собой окружность с радиусом h :

$$\frac{(z - H)^2}{h^2} + \frac{(y + h)^2}{h^2} - \frac{x^2}{c^2} = 1. \quad (1)$$


 Рис. 1. Схема вращения камеры вторым приводом ($\alpha \neq 0$)

Для определения неизвестной c вычислим координаты точки P_α , расположенной на гиперboloиде на пересечении прямой d_α с осью Ox . Абсцисса точки P_α легко вычисляется из треугольника COP_α , а поскольку точка P_α расположена на оси Ox , то остальные ее координаты равны нулю: $P_\alpha = (H \operatorname{tg} \alpha, 0, 0)$. Подставляя координаты точки P_α в уравнение (1), получим:

$$\frac{H^2}{h^2} + \frac{h^2}{h^2} - \frac{(H \operatorname{tg} \alpha)^2}{c^2} = 1,$$

откуда $c^2 = h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha$.

Таким образом, уравнение гиперboloида зависит от угла α и имеет вид:

$$\frac{(z - H)^2}{h^2} + \frac{(y + h)^2}{h^2} - \frac{x^2}{h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} = 1, \quad \alpha \neq 0. \quad (2)$$

Сечение гиперboloида (2) плоскостью Oxy представляет собой гиперболу (см. рис. 1), которая определяется уравнением

$$H^2 + (y + h)^2 - \frac{x^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} = h^2, \quad \alpha \neq 0 \quad (3)$$

и является линией пересечения прямой d_α и плоскости Oxy (при вращении этой прямой вокруг оси l_2).

Чтобы вычислить искомый угол α_0 , необходимо подставить координаты точки P_0 в уравнение (3). При этом угол α_0 определяется с точностью до знака

$$\alpha_0 = \pm \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_0^2}{(y_0 + h)^2 + H^2 - h^2}}. \quad (4)$$

Отметим, что при $H > h$ выражение в знаменателе никогда не обращается в ноль.

Поскольку вращение вокруг оси l_1 осуществляется по часовой стрелке, то при $x_0 > 0$ угол α_0 следует брать с отрицательным знаком, а при $x_0 < 0$ – с положительным. Учитывая, что при $x_0 = 0$ поворот камеры вокруг оси l_1 не требуется (то есть, $\alpha_0 = 0$), получим:

$$\alpha_0 = -\operatorname{sgn} x_0 \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_0^2}{(y_0 + h)^2 + H^2 - h^2}}. \quad (5)$$

Поскольку при $\alpha = \alpha_0$ гиперболa (3) проходит через точку P_0 , то существует угол β_0 , при повороте на который (вокруг оси l_2) камера будет направлена в точку P_0 . Вычислим этот угол.

Повернем камеру из начального положения вокруг оси l_2 на некоторый угол β ($|\beta| < \pi/2$) и обозначим оптическую ось объектива камеры через d_β . Поскольку первый привод закреплен на втором, то при этом вращении камера не только изменит

направление, но и переместится в плоскости Oyz по окружности с центром в точке D и радиусом h . Обозначим новое положение камеры через C_β . Ось l_1 также повернется вокруг оси l_2 на угол β . Обозначим ось l_1 после поворота через $l_{1\beta}$.

Вычислим ординату точки $P_\beta = (0, y, 0)$, расположенной на пересечении прямой d_β с осью Oy . Поскольку вращение вокруг оси l_2 осуществляется против часовой стрелки, то эта ордината будет иметь знак, противоположный знаку угла β . На рис. 2 изображен случай, соответствующий отрицательным значениям угла β .

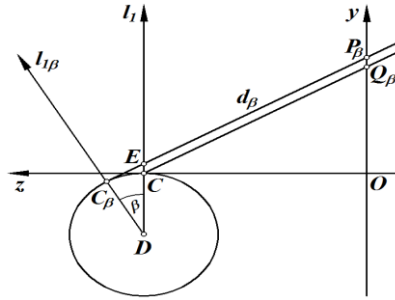


Рис. 2. Схема вращения камеры вторым приводом ($\alpha = 0$)

Нетрудно проверить, что для положительных углов β дальнейшие рассуждения будут аналогичны.

Построим вспомогательный луч CQ_β , параллельный оси d_β (см. рис. 2). Очевидно, $y = OP_\beta = OQ_\beta + P_\beta Q_\beta = OQ_\beta + EC = OQ_\beta + DE - DC$.

Из треугольников OCQ_β и CDC_β получим соответственно $OQ_\beta = -Htg\beta$ и $DE = \frac{h}{\cos\beta}$. Следовательно,

$$y = -Htg\beta + \frac{h}{\cos\beta} - h. \quad (6)$$

Чтобы найти β из уравнения (6), воспользуемся формулами двойного угла $tg\ 2\varphi = \frac{2tg\ \varphi}{1 - tg^2\ \varphi}$ и $\cos\ 2\varphi = \frac{1 - tg^2\ \varphi}{1 + tg^2\ \varphi}$, где $\varphi = \beta/2$. После несложных преобразований получим уравнение относительно переменной $t = tg(\beta/2)$:

$$(y + 2h)t^2 - 2Ht - y = 0, \quad |t| < 1. \quad (7)$$

Условие $|t| < 1$ вытекает из условия $|\beta| < \pi/2$.

При $y = -2h$ уравнение (7) вырождается и имеет корень $t = h/H$. При $y \neq -2h$ имеем квадратное уравнение. Нетрудно убедиться, что при $H > h > 0$ дискриминант уравнения (7) положителен для любого значения y (минимальное значение дискриминанта $4H^2 + 4y(y + 2h)$ достигается в точке $y = -h$ и равно $4(H^2 - h^2)$), следовательно, это уравнение имеет два корня:

$$t_1 = \frac{H + \sqrt{H^2 + y(y + 2h)}}{y + 2h}, \quad t_2 = \frac{H - \sqrt{H^2 + y(y + 2h)}}{y + 2h}.$$

Также нетрудно убедиться, что при $H > h$ $|t_1| > 1$ и $|t_2| < 1$. Таким образом, условию $|t| < 1$ удовлетворяет только корень t_2 . Запишем формулу для вычисления угла β :

$$\beta = \beta(y) = \begin{cases} 2\arctg(h/H), & y = -2h, \\ 2\arctg \frac{H - \sqrt{H^2 + y(y + 2h)}}{y + 2h}, & y \neq -2h. \end{cases} \quad (8)$$

Покажем теперь, что формулу (8) можно использовать для вычисления искомого угла β_0 . Если зафиксировать угол β и вращать камеру вокруг оси $l_{1\beta}$, то прямая d_β будет вращаться вокруг оси $l_{1\beta}$ в некоторой плоскости Π . Очевидно, $l_2 \perp l_{1\beta}$ и $\Pi \perp l_{1\beta}$. То есть, $l_2 \parallel \Pi$ и, как следствие, $Ox \parallel \Pi$. А поскольку ось Ox , расположенная в плоскости Oxy , параллельна плоскости Π , то она параллельна линии пересечения плоскости Π с плоскостью Oxy . Следовательно, ордината точки пересечения оптической оси объектива камеры с плоскостью Oxy остается неизменной при повороте вокруг оси $l_{1\beta}$ и меняется только при повороте камеры вокруг оси l_2 . То есть, для перенацеливания камеры в точки плоскости Oxy с одинаковыми ординатами требуется один и тот же угол поворота вокруг оси l_2 . В частности, для перенацеливания камеры в точку $(x_0, y_0, 0)$ требуется тот же угол β_0 , что и для точки $(0, y_0, 0)$. Таким образом, при подстановке $y = y_0$ в формулу (8) получим величину искомого угла $\beta(y_0) = \beta_0$.

2.2. Перенацеливание камеры из произвольного положения. Рассмотрим общую задачу перенацеливания, когда исходное положение камеры отлично от начального. Пусть камера направлена в некоторую точку плоскости наблюдения P_1 , и известны углы поворота приводов α_1 и β_1 . Требуется направить камеру на другую точку плоскости наблюдения $P_2 = (x_2, y_2, 0)$. Эту задачу можно решить в два шага: перевести камеру в начальное положение или направить камеру из начального положения в точку P_2 .

На первом шаге углы поворота приводов равны $-\alpha_1$ и $-\beta_1$. На втором шаге углы поворота вычисляются согласно формулам (5) и (8) и равны соответственно $\alpha(x_2)$ и $\beta(y_2)$. Очевидно, можно обойтись одним поворотом каждого из приводов, при этом углы поворота будут равны соответственно $\alpha(x_2) - \alpha_1$ и $\beta(y_2) - \beta_1$.

3. Схема системы технического зрения. Для экспериментальной проверки предложенной математической модели была создана СТЗ, состоящая из одной видеокамеры Microsoft VX-3000 [5], закрепленной на двух аналоговых сервоприводах TowerPro SG-90. Сервоприводами управляет плата Arduino [6], которая принимает команды от программы, использующей библиотеку OpenCV [7] и вращая камеру по двум осям — вертикальной и горизонтальной. Выбранная конструкция СТЗ (рис. 3) обусловлена дороговизной и сложностью управления поворотных камер, предлагаемых на рынке.



Рис. 3. Схема поворотной камеры

В каждый момент времени можно вращать только один сервопривод. Расстояние h между осями сервоприводов в данной установке равно 3 см. Шаг вращения сервоприводов — 1 градус, диапазон — 0..180 градусов, время поворота на 60 градусов — 0.1 с. Начальное положение (камера смотрит «прямо») соответствует повороту обоих сервоприводов на 90 градусов. Если наблюдатель смотрит в камеру, то вращение горизонтального сервопривода как реакция на увеличение угла происходит слева-направо, вертикального — сверху-вниз. Так, на рис. 4 показано положение камеры с горизонтальным углом 115 и вертикальным — 80 градусов.



Рис. 4. Составная часть экспериментального стенда

4. Тестирование модели. Для определения точки пересечения оптической оси объектива камеры с наблюдаемой поверхностью была установлена лазерная указка. В качестве наблюдаемой поверхности использовался лист бумаги формата А4 с координатной сеткой с шагом 1 см по обеим осям. Лист был установлен таким образом, чтобы при углах поворота сервоприводов (90° , 90°) луч лазерной указки был перпендикулярен ему и пересекал его в точке с координатами $(0, 0)$. На рис. 5,а изображена теоретическая траектория точки пересечения луча лазерной указки с листом, построенная согласно формуле (3) для угла $\alpha = -10^\circ$. На рис. 5,б приведен фотоснимок, полученный с большой выдержкой, запечатлевший поворот лазерной указки вторым сервоприводом при фиксированном угле первого сервопривода $90^\circ - \alpha = 80^\circ$. В обоих случаях расстояние H до наблюдаемой плоскости из формулы (3) равнялось 32 см.

Модель протестирована для различных значений расстояния H до наблюдаемой плоскости (от 10 до 60 см) и координат (x, y) . Наблюдалась погрешность нацеливания (от 1 до 2 см), которая объясняется следующими факторами: ограниченной точностью испытуемых приборов и их составных частей; особенностями ПО (вычисленные углы округлялись до целых) и конструктивными особенностями экспериментального стенда.

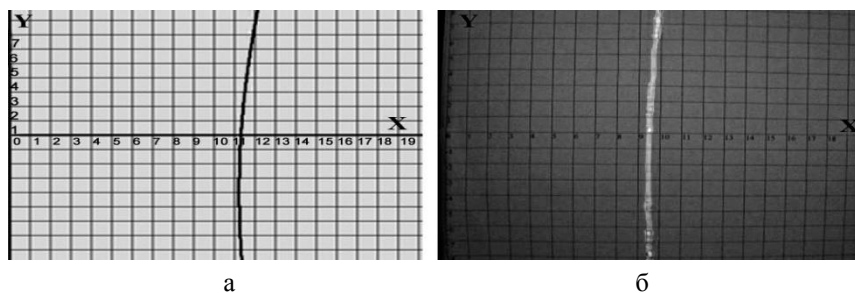


Рис. 5. Гипербола, соответствующая углу $\alpha = -10^\circ$:
а – теоретическая; б – фактическая

Проведенные эксперименты показали, что перечисленные особенности СТЗ приводят к относительно небольшим отклонениям фактической траектории оптической оси объектива камеры от теоретической (см. рис. 5). При необходимости они могут быть устранены использованием более дорогих элементов конструкции.

Заключение. В настоящей работе рассмотрены принципы управления поворотной видеокамерой в составе СТЗ для решения задачи перенацеливания. Для определенного класса поворотных видеокамер получены формулы вычисления углов поворота для нацеливания на заданную точку наблюдаемой поверхности.

Разработан программно-аппаратный макет СТЗ, проведены испытания, показавшие адекватность математической модели. Полученные результаты исследований могут применяться в разных прикладных задачах, использующих СТЗ, в частности, на борту беспилотного летательного аппарата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хамухин А.В.* Разработка и анализ высокоэффективных способов и алгоритмов автоматического сопряжения, синхронизации, юстировки изображений, управления поворотными камерами и обработки информации в приборах и системах видеонаблюдения: Дис. ... канд. тех. наук. – М., 2008. – 167 с.
2. *Хамухин А.В.* Вычисление угла упреждения при управлении наведением поворотных видеокамер на движущуюся цель // *Техника и технология.* – 2007. – № 5. – С. 34-35.
3. *Александров П.С.* Лекции по аналитической геометрии, пополненные необходимыми сведениями из алгебры с приложением собрания задач, снабженных решениями, составленного А.С. Пархоменко. – М.: Наука, 1968. – 912 с.
4. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1977. – 872 с.
5. LifeCam VX-3000. URL: <http://www.microsoft.com/hardware/ru-ru/d/lifecam-vx-3000> (дата обращения 17.02.2013).
6. Arduino. URL: <http://www.arduino.cc/> (дата обращения: 17.02.2013).
7. Библиотека OpenCV. URL: <http://opencv.willowgarage.com> (дата обращения: 17.02.2013).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.М. Хачумов.

Абрамов Николай Сергеевич – Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН; e-mail: n-say@nsa.pereslavl.ru; 152021, Ярославская область, Переславский район, с. Вельсково, ул. Петра I, д. 4а; тел.: 89806523753; инженер-исследователь; аспирант.

Ромакин Владимир Александрович – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: insight.ru@gmail.com; 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: +74953348910; к.т.н.; старший научный сотрудник.

Abramov Nikolai Sergeevich – Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences; e-mail: n-say@nsa.pereslavl.ru; 4 "a", Peter I street, Veskovo, Pereslavskiy district, Yaroslavl region, 152021, Russia; phone: +79806523753; postgraduate student; engineer.

Romakin Vladimir Aleksandrovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: insight.ru@gmail.com; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953348910; cand. of eng. sc.; senior scientist.

УДК 658.512

М.В. Луцан, Е.В. Нужнов

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ОЧЕРЕДЕЙ КОНТЕЙНЕРОВ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ГРУЗОВОМ ТЕРМИНАЛЕ*

В статье рассматривается транзитный автоматизированный грузовой терминал (АГТ), перераспределяющий трехмерные разногабаритные блоки, прибывающие в разногабаритных контейнерах, через склад временного хранения в контейнеры, формируемые для последующей отправки по предварительным заказам потребителей. Ввиду ограниченности ресурсов транспортировки на АГТ могут образоваться очереди на разгрузку прибывающих контейнеров и загрузку контейнеров, отправляемых по заказам. Предлагаются эвристиче-

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты: № 13-07-00450, № 13-07-12091).