

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОТОГРАММЕТРИИ

С. Г. КОНОВ, А. В. КРУТОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: public32@gmail.com

Рассмотрен принцип работы системы, следящей за перемещениями объектов в пространстве и основанной на технологии фотограмметрии. Исследован математический аппарат и алгоритм работы данной системы.

Ключевые слова: пространственные перемещения, система слежения, фотограмметрия, измерительный маркер.

Examined the work principal of tracking system, based on technology of photogrammetry, researched mathematical apparatus, explored working algorithm for the system and software.

Key words: three-dimensional measuring, following system, measuring sight.

В современном машиностроительном производстве и робототехнике часто возникает задача слежения за пространственными перемещениями подвижных объектов, таких как узлы станочных систем, мехатронные системы и робототехнические комплексы [1]. Как правило, данные задачи решают путем интеграции в конструкцию механических систем контактных датчиков перемещения: резистивных, емкостных, индуктивных, растровых, интерференционных, выбираемых в зависимости от требуемой точности и диапазонов перемещений. Главным недостатком их применения является необходимость механического контакта рабочих органов датчиков с подвижными элементами подконтрольных систем [2]. Так, в резистивных преобразователях каретка линейного перемещения сопрягается с подвижным элементом переменного резистора, а в емкостных преобразователях обкладки конденсаторов крепятся на двух разных частях подвижной

системы, что при перемещении подвижных органов приводит к изменению емкости конденсатора.

Процесс установки и настройки подобных датчиков достаточно трудоемок. Однако более сложная проблема — преобразование информации о линейно-угловых перемещениях отдельных органов в конечное перемещение устройства в декартовой системе координат.

Например, при использовании шестидвигательных роботов-манипуляторов (рис. 1) для контроля пространственных перемещений точки, находящейся на конце манипулятора, необходимо преобразовать шесть угловых перемещений в три линейных, что в ряде случаев бывает затруднительно как с точки зрения математического аппарата, так и с позиции калибровки подобной системы.

В последние годы с развитием компьютерной техники и систем видеозаписи все большую популярность приобретают бесконтактные методы контроля форм и перемещений объектов в пространстве. Одной из наиболее естественных, с позиции преобразования измерительной информации, является технология фотограмметрии. Она основана на обработке пар изображений объекта измерений, полученных одновременно с двух различных ракурсов. В качестве математической основы фотограмметрии [3] используют проективную модель камеры, содержащую девять параметров, задающих ее однозначное расположение в пространстве.

При работе с элементами ориентирования фотоснимков все операции проводят в четырех базовых системах координат (рис. 2):

$OX_aY_aZ_a$ — принята за абсолютную с центром в некоторой точке O ;

$SXYZ$ — привязана к модели камеры в точке S центра проекций, оси которой направлены так же, как и в предыдущей системе координат;

$X_pO_pY_p$ — плоская система координат изображения;

$SX'Y'Z'$ — привязана к модели камеры в точке S центра проекций, ось Z' направлена перпендикулярно плоскости снимка, а оси X' , Y' параллельны осям X_p , Y_p системы координат изображения.



Рис. 1. Промышленный шестикординатный робот-манипулятор

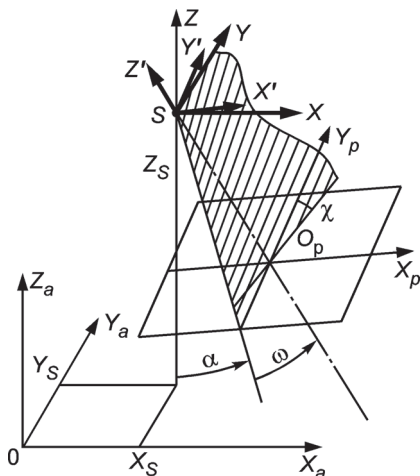


Рис. 2. Проективная модель камеры

в наклонной плоскости SO_pY между главной оптической осью SO_p и его проекцией на плоскость SXZ ; χ — угол поворота в плоскости снимка между осью Y' и следом сечения плоскости SO_pY .

Элементами *внутреннего ориентирования* называют величины, определяющие положение центра проекции относительно плоскости снимка. Это фокусное расстояние f и координаты x_0, y_0 точки пересечения главной оптической оси и плоскости снимка, определяемые при калибровке камеры.

Измерительная система имеет различную чувствительность, погрешность и диапазон измерений, которые зависят от взаимного расположения камер в пространстве (угла α между их оптическими осями) и расстояния между центрами проекций камер. Диапазон измерений подобных систем составляет от нескольких десятков миллиметров до десятков метров, а погрешность — от нескольких миллиметров до нескольких десятков микрометров [4].

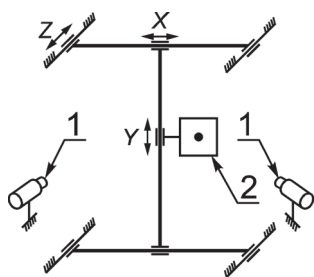


Рис. 3. Принципиальная схема следящей системы:

1 — измерительные камеры;
2 — маркер

Проективная модель имеет шесть элементов *внешнего ориентирования* (см. рис. 2): три (x_s, y_s, z_s) определяют пространственное положение центра проекций S относительно системы координат, принятой за глобальную; другие три — углы (α, ω, χ) , задающие угловое расположение главной оптической оси камеры в пространстве. Здесь α — продольный угол наклона, отсчитываемый в плоскости SXZ между осью SZ и проекцией главной оптической оси SO_p на плоскость SXZ ; ω — поперечный угол наклона, лежащий

в наклонной плоскости SO_pY между главной оптической осью SO_p и его проекцией на плоскость SXZ ; χ — угол поворота в плоскости снимка между осью Y' и следом сечения плоскости SO_pY .

Принципиальная схема следящей системы на базе фотограмметрической технологии получения измерительной информации показана на рис. 3. Измерительные

камеры 1 последовательно захватывают пары кадров со скоростью порядка 33 кадра в секунду. Далее в пространстве каждого изображения проводят распознавание координат центра измерительного маркера 2. Полученные координаты преобразуют в трехмерную систему координат путем решения системы линейных уравнений методом наименьших квадратов:

$$\left. \begin{aligned} x_L &= x_{L0} - f_L \frac{a_{L1}(x - x_{LS}) + a_{L2}(y - y_{LS}) + a_{L3}(z - z_{LS})}{c_{L1}(x - x_{LS}) + c_{L2}(y - y_{LS}) + c_{L3}(z - z_{LS})}, \\ y_L &= y_{L0} - f_L \frac{b_{L1}(x - x_{LS}) + b_{L2}(y - y_{LS}) + b_{L3}(z - z_{LS})}{c_{L1}(x - x_{LS}) + c_{L2}(y - y_{LS}) + c_{L3}(z - z_{LS})}, \\ x_R &= x_{R0} - f_R \frac{a_{R1}(x - x_{RS}) + a_{R2}(y - y_{RS}) + a_{R3}(z - z_{RS})}{c_{R1}(x - x_{RS}) + c_{R2}(y - y_{RS}) + c_{R3}(z - z_{RS})}, \\ y_R &= y_{R0} - f_R \frac{b_{R1}(x - x_{RS}) + b_{R2}(y - y_{RS}) + b_{R3}(z - z_{RS})}{c_{R1}(x - x_{RS}) + c_{R2}(y - y_{RS}) + c_{R3}(z - z_{RS})}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x_L, y_L, x_R, y_R — координаты центра измерительного маркера, распознанные в двухмерном пространстве изображения; L, R — индексы, соответствуют левой и правой камерам; f_L, f_R — расстояния от плоскости изображения до центра проекций; $x_{LS}, y_{LS}, z_{LS}, x_{RS}, y_{RS}, z_{RS}$ — координаты центров проекции; $x_{L0}, y_{L0}, x_{R0}, y_{R0}$ — координаты точки пересечения главной оптической оси и плоскости изображения камеры в двухмерном пространстве изображения; $a_{L1}, a_{L2}, a_{L3}, b_{L1}, b_{L2}, b_{L3}, c_{L1}, c_{L2}, c_{L3}, a_{R1}, a_{R2}, a_{R3}, b_{R1}, b_{R2}, b_{R3}, c_{R1}, c_{R2}, c_{R3}$ — направляющие косинусы главных оптических осей; x, y, z — искомые координаты центра измерительного маркера в трехмерной системе координат.

Решив систему уравнений (1), получим координаты центра измерительного маркера в трехмерной системе координат, принятой за глобальную. Для упрощения расчетов приведем систему (1) к матричной форме путем введения дополнительных коэффициентов.

Для работы в режиме слежения за перемещениями распознавание координат центра маркера [5] в пространстве изображений и вычисление его трехмерных координат проводят при захвате каждой после-

дующей пары изображений в режиме видеопотока. Для распознавания координат центра используют алгоритм вычисления центра масс (с предварительной нормализацией) области изображения, расположенной в окрестностях координат центра маркера, распознанных в предыдущей итерации. Для данного алгоритма необходима ручная установка первого приближения при запуске процедуры слежения. В целях исключения ручного ввода применяют маркер сложной формы (отличной от круга), тогда в качестве первого приближения выбирают координаты, найденные путем корреляционного анализа бинаризованного изображения.

В рамках исследований был собран экспериментальный макет системы на базе двух видеокамер, подключаемых посредством интерфейса USB к компьютеру, а также разработано программное обеспечение, реализующее описанный выше подход к обработке измерительной информации.

Предложенная измерительная система может быть применена для слежения за перемещениями объектов в машиностроении [6], мультимедийных технологиях, координатно-измерительной технике [7], системах диагностики механических устройств.

Выводы. Простота алгоритма обработки информации позволила получить быстрое действие до 33 отсчетов в секунду без применения специального оборудования. Погрешность определения пространственных координат измерительного маркера при работе на расстоянии до 1 м по каждой из осей пространственных координат составила порядка 0,3 мм в статическом режиме и 0,7—0,8 мм в динамическом. Основной недостаток предложенного подхода — необходимость обеспечения визуального контакта камер и измерительного маркера на протяжении всего периода слежения. Главное достоинство системы — отсутствие механической связи ее чувствительных элементов с объектом измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С. Н., Телешевский В. И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7; Grigoriev S. N., Teleshevskii V. I. Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. С. 744—749.

2. **Григорьев С. Н., Конов С. Г.** Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 9—13.

3. **Назаров А. С.** Фотограмметрия. М.: ТетраСистемс, 2006.

4. **Geodetic Systems Inc.** [Офиц. сайт]. <http://www.geodetic.com/> (дата обращения 01.11.2013 г.).

5. **Конов С. Г., Марков Б. Н.** Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.

6. **Конов С. Г., Логинов А. А., Крутов А. В.** Система слежения за пространственными перемещениями подвижных узлов станков и робототехники // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 10—12; **Konov S. G., Loginov A. A., Krutov A. V.** System for tracking spatial displacements of moving parts of machine tools and robotic equipment // Measurement Techniques. 2012. V. 54. N 10. P. 1—4.

7. **Конов С. Г.** Мобильная координатно-измерительная система контактного типа на базе фотограмметрической системы // Измерительная техника. 2010. № 2. С. 24—26; **Konov S. G.** Mobile contact-type coordinate-measurement system based on photogrammetric system // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 2. P. 149—152.

Дата принятия 15.11.2013 г.

