

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ АНАМОРФОЗНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УГЛОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ

© 2009 г. А. Д. Мерсон, И. А. Коняхин, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: oeps@grv.ifmo.ru

Системы измерения угловых смещений объектов широко применяются для контроля взаимного положения объектов при решении измерительных задач в промышленности и научно-технической деятельности. Недостатком существующей системы является невозможность измерения коллимационных углов. Перспективным является построение измерительной системы на основе явления анаморфозы. Авторами предложена анаморфозная измерительная система, позволяющая измерять все три угловые координаты контролируемого объекта.

Коды OCIS: 120.0230.

Поступила в редакцию 02.06.2008.

Введение

Измерение угловых смещений объектов требуется при решении многих прикладных задач. В приборостроении – это контроль геометрических параметров изделий и их пространственного положения, в строительстве и машиностроении – контроль деформаций отдельных элементов и конструкции в целом, в робототехнике и навигации – определение положения контролируемых объектов в некой фиксированной системе координат. Наиболее эффективными являются бесконтактные оптико-электронные измерительные средства.

Угловая пространственная ориентация контролируемого объекта определяется тремя координатами: углом скручивания (угол поворота относительно линии визирования объекта) и двумя коллимационными углами. Перспективным является построение измерительной системы на основе явления анаморфозы, использование которого позволяет увеличить диапазон измерения угла скручивания [1]. Известные устройства такого типа являются однокоординатными и не позволяют измерять коллимационные углы. Авторами предлагается модификация анаморфозной измерительной системы, позволяющая определять все три угловые координаты.

Система измерения угла скручивания на основе явления анаморфозы

Однокоординатная анаморфозная измерительная система [1] состоит из автоколлиматора, установленного на жесткой базе, и отражательного контрольного элемента (КЭ), расположенного на контролируемом объекте (рис. 1).

Автоколлиматор 1 включает в себя источник излучения 2, марку 4, установленную в фокальной плоскости объектива 6, и светоделитель 5. Приемный канал состоит из ПЗС матрицы 7 и цифровой системы обработки изображения (на рисунке не показана). КЭ состоит из анаморфозной системы 8, ретрорефлектора (трипельпризмы) 9 и дополнительного отражателя (ДО) 10.

Параллельный пучок лучей, формируемый объективом 6 автоколлиматора, проходит анаморфозную телескопическую систему 8, затем ретрорефлектором 9 направляется на дополнительный отражатель 10, представляющий собой двугранное зеркало. Двугранное зеркало отражает пучок, одновременно разворачивая его на 90° в плоскости, перпендикулярной оптической оси, после чего он вторично проходит ретрорефлектор и анаморфозную систему. Такой разворот с повторным прохождением оптических элементов позволяет увеличить ко-

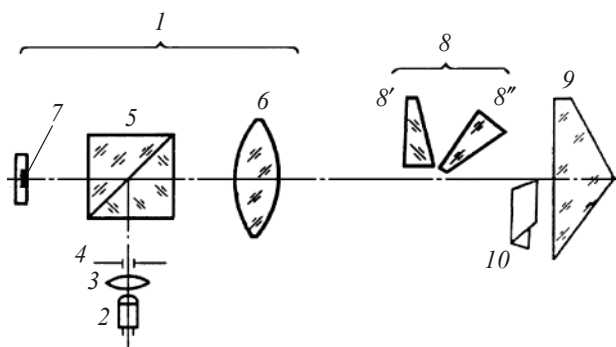


Рис. 1. Оптическая схема системы измерения угла скручивания, основанной на явлении анаморфозы.

эффицент анаморфозы и, следовательно, повысить чувствительность системы [1].

Объектив 6 автоколлиматора 1 формирует изображение марки 4, трансформированное анаморфозной системой 3, на анализаторе – ПЗС матрице 7.

В результате обработки изображения марки получают параметры \tilde{X} и \tilde{Y} , которые являются шириной и высотой изображения соответственно. Поворот контролируемого объекта на угол скручивания вследствие соответствующего разворота главного сечения анаморфозной телескопической системы приводит к изменению этих параметров, что и позволяет определить угол скручивания по выражению [1]

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\tilde{Y} - \tilde{X}}{\tilde{Y} + \tilde{X}} \right) \left(\frac{A+1}{A-1} \right), \quad (1)$$

где A – коэффициент анаморфозы телескопической анаморфозной системы.

Представляется возможным измерять с помощью данной системы не только угол скручивания, но и

коллимационные углы. Для измерения коллимационных углов предлагается использовать свойства дополнительного отражателя 10. Проанализируем различные варианты его конфигурации.

Анализ действия дополнительного отражателя в виде двугранного зеркала и косоугольного отражателя

Орт \mathbf{V} пучка после отражателя находим из соотношения [2]

$$\mathbf{V} = M_r M_d M_r^{-1} \mathbf{A}, \quad (2)$$

где \mathbf{A} – орт падающего на отражатель пучка, M_d – матрица действия дополнительного отражателя в исходном положении, M_r и M_r^{-1} – матрицы прямого и обратного преобразований координат соответственно, описывающие поворот отражателя из исходного положения в текущее. Для малых углов матрица преобразования координат в общем виде записывается следующим образом:

$$M_r = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}(\Theta_2^2 + \Theta_3^2) & -\Theta_3 + (1-w)\Theta_1\Theta_2 & \Theta_2 + (1-p)\Theta_1\Theta_3 \\ \Theta_3 + w\Theta_1\Theta_2 & 1 - \frac{1}{2}(\Theta_1^2 + \Theta_3^2) & -\Theta_1 + (1-v)\Theta_2\Theta_3 \\ -\Theta_2 + p\Theta_1\Theta_3 & \Theta_1 + v\Theta_2\Theta_3 & 1 - \frac{1}{2}(\Theta_1^2 + \Theta_2^2) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ – углы трех последовательных поворотов отражателя относительно осей связанной с ним системы координат; p, v, w – параметры, значения которых определяются конкретной последовательностью поворотов и приведены в таблице [3].

Матрица действия двугранного зеркала имеет вид

$$M_d = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Значения параметров матрицы преобразования координат

Последовательность поворотов	Значения параметров		
	p	v	w
$\Theta_1 - \Theta_2 - \Theta_3$	1	1	1
$\Theta_3 - \Theta_1 - \Theta_2$	0	0	1
$\Theta_2 - \Theta_3 - \Theta_1$	0	1	0
$\Theta_3 - \Theta_2 - \Theta_1$	0	0	0
$\Theta_2 - \Theta_1 - \Theta_3$	1	1	0
$\Theta_1 - \Theta_3 - \Theta_2$	1	0	1

Орт падающего пучка при осевом ходе лучей

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Подставив (3), (4), (5) в (2) и выполнив матричное умножение, получим

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \Theta_2 - \Theta_1 - (1+v)\Theta_2\Theta_3 + (1-p)\Theta_1\Theta_3 \\ \Theta_2 - \Theta_1 + (1-v)\Theta_2\Theta_3 - (1+p)\Theta_1\Theta_3 \\ 1 - (\Theta_1 - \Theta_2)^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Из анализа выражения (6) следует, что координаты орта \mathbf{V} не позволяют однозначно определить коллимационные углы Θ_1, Θ_2 . Таким образом, при использовании в качестве ДО двугранного зеркала измерение коллимационных угловых смещений контролируемого объекта невозможно.

Предлагается использовать вместо двугранного зеркала косоугольный уголкового отражателя (рис. 2).

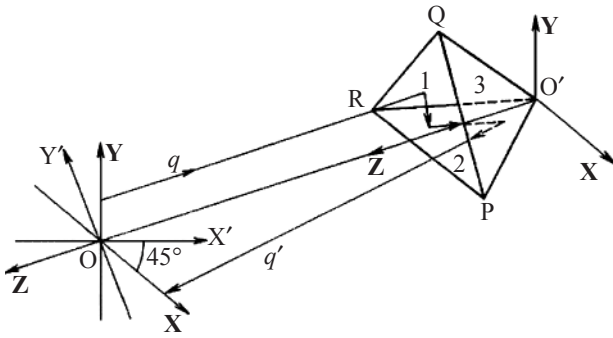


Рис. 2. Косоугольный уголкового отражатель.

Двугранные углы между гранями с номерами 1, 2 и 2, 3 равны 60° , а между гранями 1, 3 – 120° . Отражатель ориентируется относительно системы координат $O'XYZ$ так, что фронтальная грань PQR лежит в плоскости $XO'Y$, а ребро двугранного угла, равного 120° , – в плоскости $YO'Z$ [2].

Матрица действия отражателя имеет вид

$$M_d = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Подставив аналогично предыдущим расчетам (7), (3), (5) в (2), получим

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \Theta_2 + \Theta_1 - (1 - \nu)\Theta_2\Theta_3 + (1 - p)\Theta_1\Theta_3 \\ \Theta_2 - \Theta_1 + (1 - \nu)\Theta_2\Theta_3 + (1 - p)\Theta_1\Theta_3 \\ 1 - \Theta_1^2 - \Theta_2^2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Очевидно, что влияние угла скручивания Θ_3 на коллимационные углы отсутствует при значениях параметров $p = 1$, $\nu = 1$, что соответствует последовательностям поворотов отражателя $\Theta_1 - \Theta_2 - \Theta_3$ и $\Theta_2 - \Theta_1 - \Theta_3$, заданных в строках 1 и 5 таблицы соответственно. Взаимное влияние коллимационных углов на координаты пучка устраняется поворотом на 45° системы координат, связанной с анализатором ($OX'Y'Z$ на рис. 2).

Координаты орта пучка после поворота анализатора принимают вид

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sqrt{2}\Theta_1 \\ \sqrt{2}\Theta_2 \\ 1 - \Theta_1^2 - \Theta_2^2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что для определения коллимационных углов Θ_1 , Θ_2 следует измерить смещения изображения марки по осям OX и OY , пропорциональные первым двум составляющим орта \mathbf{B} . При этом угол скручивания Θ_3 независимо от конфигурации дополнительного отражателя определяется по ширине и высоте изображения марки в соответствии с выражением (1). Таким образом, использование предложенного отражателя вместо двугранного зеркала позволяет реализовать трехкоординатную углоизмерительную систему.

Заключение

Одним из перспективных методов измерения пространственного смещения объектов является метод на основе явления анаморфозы. Существующая реализация метода позволяет определить только угол скручивания, в то время как в большинстве практических применений необходимо также измерять коллимационные углы. Авторами предложено в качестве дополнительного отражателя для измерения коллимационных углов вместо двугранного зеркала использовать уголкового косоугольного отражателя. Такая модификация дает возможность измерять коллимационные углы, что позволяет реализовать трехкоординатную углоизмерительную систему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубенко Д.Ю. Исследование отражателя с анаморфозным элементом для автоколлимационного угломера // Изв. вузов. Приборостроение. 1993. № 3. С. 76–80.
2. Бондаренко И.Д. Принципы построения фотоэлектрических автоколлиматоров. Минск: Университетское изд., 1984. 190 с.
3. Джабиев А.Н., Коняхин И.А., Панков Э.Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: изд. ГИТМО (ТУ), 2000. 197 с.