

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОВОРОТА БАЗОВОГО БЛОКА ПРОГИБОМЕРА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОНТРОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ХОАНГ АНЬ ФЫОНГ, А. А. ГОРБАЧЁВ, С. В. МИХЕЕВ, М. А. КЛЕЩЕНОК

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: gorbachev@corp.ifmo.ru*

Рассматривается оптико-электронная система определения пространственного положения сложных инженерных сооружений. Проанализировано влияние поворота оптико-электронной системы на погрешность измерения величины смещения контрольного элемента. С помощью элементов векторной алгебры и матричного анализа предложен способ определения влияния угла поворота базового блока оптико-электронной системы и направления оси поворота на координаты изображений контрольных элементов, расположенных в точках измерения пространственных координат инженерных сооружений. Расчет координат изображений контрольного элемента в плоскости анализа, проведенный в среде MatLab для заданных точек поворота, показывает, что на результат работы подобных оптико-электронных систем влияет не только угол поворота, но и точка, относительно которой поворачивается система.

Ключевые слова: оптико-электронный прогибомер, контрольный элемент, поле анализа, система отклонения лучей, инвариантная система, векторный анализ

В процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций, таких как плавучие доки, радиотелескопы, стадионы, мосты, здания и т.п., возможны деформации отдельных их элементов. Превышение порогового значения деформации, которое заложено при проектировании таких конструкций, может привести к катастрофе, например, к обрушению крыши сооружения [1, 2], разрушению или затоплению плавучего дока [3, 4]. Поэтому контроль пространственного положения элементов крупногабаритных конструкций является важной задачей. Для решения этой задачи в ряде случаев применяются оптико-электронные системы (ОЭС), обеспечивающие высокую точность измерений пространственных координат объектов и сокращение времени измерения [5–8].

Одной из таких систем является оптико-электронный прогибомер, позволяющий определять деформации плавучего дока [9, 10]. В состав прогибомера (рис. 1) входят активные контрольные элементы 1 и 2 (КЭ), размещаемые в исследуемых точках объекта, система отклонения лучей 3 (СОЛ), функция которой состоит в изменении направления оптического излучения от КЭ, и видеокамера, в состав которой входит объектив 4, формирующий изображение КЭ на многоэлементном приемнике оптического излучения 5. Система отклонения лучей, объектив и многоэлементный приемник оптического излучения жестко зафиксированы в базовом блоке (ББ), поэтому поворот ББ приводит к повороту расположенных внутри него элементов. Оптико-электронный прогибомер, кроме плавучего дока, может быть использован для контроля пространственных координат сложных инженерных сооружений.

В оптико-электронном прогибомере направление референтной прямой задается положением ББ в пространстве. При эксплуатации прогибомера внешние воздействия могут привести к повороту ББ и соответственно к изменению направления референтной прямой. При этом поворот базового блока приведет к изменению координат изображений контрольных элементов и погрешности определения прогиба конструкции. Этими факторами обуславливается

необходимость определения зависимости координат изображений КЭ от параметров базового блока (угла и оси поворота).

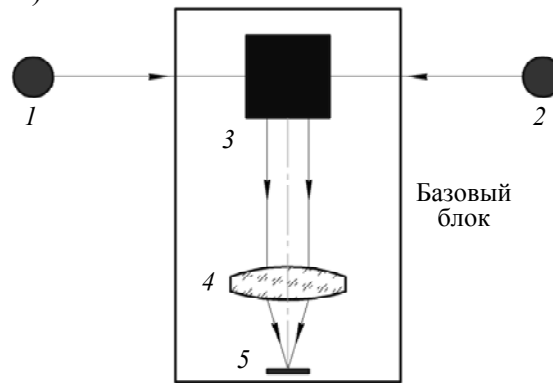


Рис. 1

Один из способов совершенствования измерительных ОЭС — использование в их составе инвариантных оптических систем [11–13], например зеркально-призменных систем. Применение зеркал и призм в оптических системах зависит от назначения ОЭС. Математическое описание зеркальных систем проще призмных, что объясняется отсутствием аберраций при любом ходе лучей. В этой связи в данном исследовании анализ инвариантных оптических систем проводится на основе плоских зеркал.

Существующие зеркальные системы можно представить в виде комбинации трех элементарных систем: одиночного зеркала, углового зеркала и зеркального ромба [14]. В качестве СОЛ можно рассматривать только одиночное и угловое зеркала, так как зеркальный ромб не меняет угол отклонения оптической оси системы, а приводит лишь к ее смещению. Соответственно можно создать три СОЛ на базе одиночного и углового зеркал: два плоских одиночных зеркала, два угловых зеркала, одно плоское одиночное и одно угловое зеркало [15].

В настоящей статье рассматривается влияние поворота базового блока на положение координат изображений контрольных элементов 1 и 2 в плоскости анализа (см. рис. 1). Используется система с двумя одиночными зеркалами [16]. Отражающая поверхность одиночного зеркала 1 (рис. 2) расположена под углом 45° к оси x неподвижной системы координат x_{yz} , а отражающая поверхность одиночного зеркала 2 — под углом -45° к этой оси.

Базовый блок состоит из двух противоположно направленных измерительных каналов (см. рис. 1), которые работают одинаково. Поэтому в рамках исследования достаточно привести выражения для одного канала, работающего, например, по КЭ₁ (на рис. 1 левый измерительный канал).

Будем использовать три системы координат (СК): неподвижную СК x_{yz} , СК видеокамеры $x_c y_c z_c$ до поворота базового блока, СК видеокамеры $x'_c y'_c z'_c$ после поворота базового блока. За начало отсчета СК $x_c y_c z_c$ (точка O_c на рис. 2) примем переднюю главную точку оптической системы [17]. В неподвижной СК x_{yz} 1-й контрольный элемент (КЭ₁) имеет координаты $S_1(x_{S_1}, y_{S_1}, z_{S_1})$, а направление нормали зеркальной поверхности 1 представлено ортом $N_1 = (\sin(\pi/4), 0, \cos(\pi/4))$. Начало СК x_{yz} совмещено с точкой пересечения 1 зеркал, т.е. $I(0, 0, 0)$.

Рассмотрим поворот базового блока в неподвижной СК x_{yz} вокруг произвольной оси L на угол φ (см. рис. 2 — показан поворот ББ вокруг оси, параллельной оси y). Произвольная ось L проходит через точку $L_0(x_{L_0}, y_{L_0}, z_{L_0})$ с единичным направляющим вектором $L = (l_x, l_y, l_z)$, т.е. $l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 = 1$. При повороте базового блока изображение КЭ₁ в плоско-

сти анализа смещается. Координаты этого изображения в СК $x'_c y'_c z'_c$ (точка $V'_1(x_{V'_1}, y_{V'_1})$) в плоскости анализа, (рис. 2) можно определить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_{V'_1} &= x'_{c_1} f' / z'_{c_1}; \\ y_{V'_1} &= y'_{c_1} f' / z'_{c_1}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $(x'_{c_1}, y'_{c_1}, z'_{c_1})$ — координаты зеркального изображения КЭ₁ (точка S''_1) в СК $x'_c y'_c z'_c$; f' — заднее фокусное расстояние объектива видеокамеры.

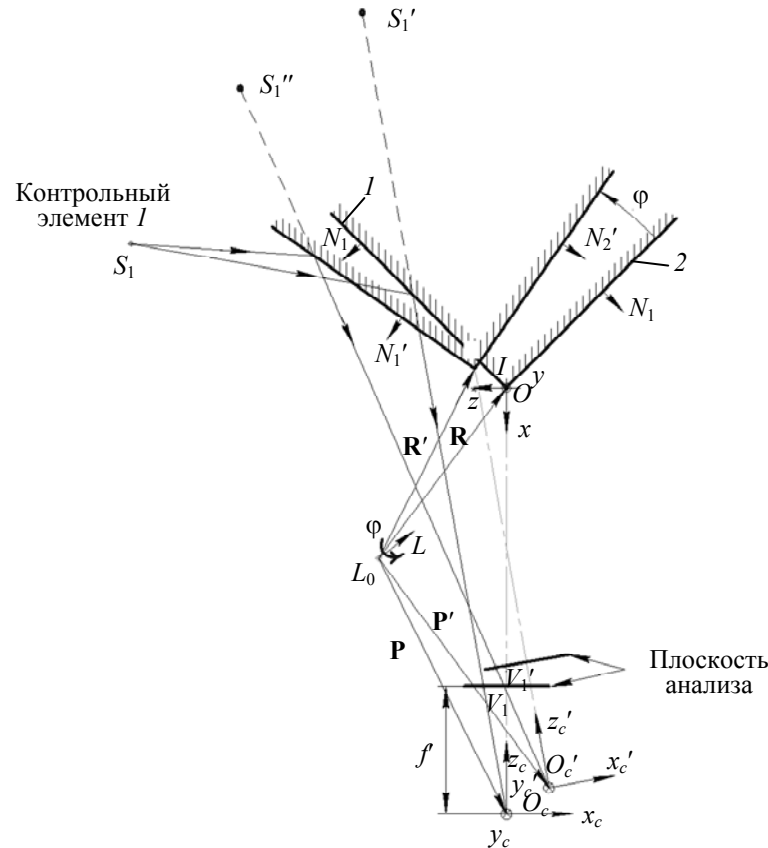


Рис. 2

Координаты зеркального изображения КЭ₁ определяются по формулам (1) после преобразования СК $x y z$ в СК $x'_c y'_c z'_c$. Пересчет координат осуществляется по выражению

$${}^c S''_1 = T_{xyz \rightarrow x'_c y'_c z'_c} \cdot S''_1, \quad (2)$$

где $S''_1 = (x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1)^T$ — матрица-столбец координат зеркального изображения КЭ₁ после поворота базового блока; $T_{xyz \rightarrow x'_c y'_c z'_c}$ — матрица преобразования СК $x y z$ в СК $x'_c y'_c z'_c$.

В общем случае матрицу преобразования можно записать как

$$T_{xyz \rightarrow x'_c y'_c z'_c} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{k} & 0 \\ \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{k} & 0 \\ \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{O'_c} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{O'_c} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{O'_c} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}; \mathbf{i}'_c, \mathbf{j}'_c, \mathbf{k}'_c$ — соответственно орты осей систем координат $x y z, x'_c y'_c z'_c$; $(\mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{i})$, например, — скалярное произведение ортов \mathbf{i}'_c и \mathbf{i} ; $(x_{O'_c}, y_{O'_c}, z_{O'_c})$ — координаты начала СК $x'_c y'_c z'_c$ в СК $x y z$.

При повороте базового блока вокруг любой оси плоскость анализа поворачивается вместе с зеркальной системой, поэтому следует перейти к СК видеокамеры $x_c y_c z_c$, $x'_c y'_c z'_c$ до и после поворота ББ соответственно.

В неподвижной СК $x y z$ орты осей можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{i}_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \mathbf{j}_c = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{k}_c = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{i}_c, \mathbf{j}_c, \mathbf{k}_c$ — орты осей СК видеокамеры $x_c y_c z_c$ до поворота.

Орты $\mathbf{i}'_c, \mathbf{j}'_c, \mathbf{k}'_c$ в СК $x y z$ после поворота СК $x_c y_c z_c$ определяются формулой Родрига [18]:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}'_c &= \mathbf{i}_c \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{i}_c) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{i}_c) \cdot \sin \varphi; \\ \mathbf{j}'_c &= \mathbf{j}_c \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{j}_c) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{j}_c) \cdot \sin \varphi; \\ \mathbf{k}'_c &= \mathbf{k}_c \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{k}_c) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{k}_c) \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$

где знаки „ \cdot “ и „ \times “ — скалярное и векторное произведение векторов соответственно.

В неподвижной СК $x y z$ после поворота базового блока системе координат $x_c y_c z_c$ будет соответствовать система координат $x'_c y'_c z'_c$, точке $O_c(x_{O_c}, y_{O_c}, z_{O_c})$ — точка $O'_c(x_{O'_c}, y_{O'_c}, z_{O'_c})$. Если известны точка $L_0(x_{L_0}, y_{L_0}, z_{L_0})$, через которую проходит ось поворота L , и координаты вектора $\mathbf{P}'(x_{P'}, y_{P'}, z_{P'})$, то можно определить координаты точки $O'_c(x_{O'_c}, y_{O'_c}, z_{O'_c})$:

$$O'_c = L_0 + \mathbf{P}'. \quad (4)$$

Значение вектора \mathbf{P}' (см. рис. 2) после его поворота вокруг произвольной оси L на угол φ в неподвижной СК $x y z$ связано формулой Родрига с его начальным значением \mathbf{P} до поворота [18]:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{P} \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{P}) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{P}) \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

где координаты вектора \mathbf{P} : $P = O_c - L_0$.

Координаты зеркального изображения КЭ₁ в СК $x y z$ после поворота базового блока определяются выражением

$$\mathbf{S}''_1 = \mathbf{M}'_1 \cdot \mathbf{S}_1 - 2d_1 \cdot \mathbf{N}'_1, \quad (6)$$

где \mathbf{M}'_1 — матрица действия одиночного зеркала I , d_1 — расстояние от начала СК $x y z$ до зеркала I после его поворота, \mathbf{N}'_1 — орт нормали зеркала I после его поворота.

Орт \mathbf{N}'_1 как результат поворота орта нормали \mathbf{N}_1 зеркала I вокруг оси L (аналогично формуле (5) для вектора \mathbf{P}') определяется выражением

$$\mathbf{N}'_1 = \mathbf{N}_1 \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}_1) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{N}_1) \cdot \sin \varphi. \quad (7)$$

В этом случае матрица \mathbf{M}'_1 определяется как [14]

$$\mathbf{M}'_1 = \begin{pmatrix} 1 - 2n'^2_{1x} & -2n'_{1x}n'_{1y} & -2n'_{1x}n'_{1z} & 0 \\ -2n'_{1x}n'_{1y} & 1 - 2n'^2_{1y} & -2n'_{1y}n'_{1z} & 0 \\ -2n'_{1x}n'_{1z} & -2n'_{1y}n'_{1z} & 1 - 2n'^2_{1z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $(n'_{1x}, n'_{1y}, n'_{1z})$ — проекция орта \mathbf{N}'_1 на неподвижную СК $x y z$.

Расстояние

$$d_1 = -\mathbf{I}' \cdot \mathbf{N}'^T_1, \quad (9)$$

где $\mathbf{I}' = (x_{I'} \ y_{I'} \ z_{I'})$ — матрица-строка точки пересечения I зеркал после их поворота, $\mathbf{N}_1'^T$ — матрица-столбец орта нормали зеркала I , $\mathbf{N}_1' = (n'_{1x} \ n'_{1y} \ n'_{1z})$.

Координаты точки I' можно найти из выражения $I' = L_0 + \mathbf{R}'$. Значение вектора \mathbf{R}' (см. рис. 2), аналогично выражениям (5) и (7), определяется формулой Родрига [18]:

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} \cdot \cos \varphi + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{R}) \cdot (1 - \cos \varphi) + (\mathbf{L} \times \mathbf{R}) \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

где \mathbf{R} — вектор точки пересечения I зеркал до поворота вокруг произвольной оси L , $\mathbf{R} = \mathbf{I} - L_0 = (-x_{L_0}, -y_{L_0}, -z_{L_0})$.

Расчет координат изображения КЭ₁ в СК $x'_c y'_c z'_c$ по вышеприведенным формулам возможен при условии, что известны ось L , точка $L_0(x_{L_0}, y_{L_0}, z_{L_0})$ и угол поворота φ . В частном случае в качестве оси L можно использовать оси x, y, z неподвижной СК xyz . Ниже приведены результаты вычисления координат изображений КЭ в плоскости анализа при повороте базового блока относительно осей x, y, z .

Поворот базового блока вокруг оси x на угол φ :

$$V'_1 = \begin{pmatrix} \frac{f' \cdot x_{S_1}}{q + z_{S_1} \cdot \cos \varphi - y_{S_1} \cdot \sin \varphi} \\ -f' \left(\frac{y_{S_1} \cdot \cos \varphi + z_{S_1} \cdot \sin \varphi}{q + z_{S_1} \cdot \cos \varphi - y_{S_1} \cdot \sin \varphi} \right) \end{pmatrix}; \quad V'_2 = \begin{pmatrix} \frac{-f' \cdot x_{S_2}}{q - z_{S_2} \cdot \cos \varphi + y_{S_2} \cdot \sin \varphi} \\ -f' \left(\frac{y_{S_2} \cdot \cos \varphi + z_{S_2} \cdot \sin \varphi}{q - z_{S_2} \cdot \cos \varphi + y_{S_2} \cdot \sin \varphi} \right) \end{pmatrix},$$

где V'_1 и V'_2 — координаты изображения в плоскости анализа для левого и правого каналов соответственно, q — расстояние от точки I пересечения зеркал до СК видеокамеры (отрезок IO_c или $I'O'_c$).

Поворот базового блока вокруг оси y на угол φ :

$$V'_1 = \begin{pmatrix} \frac{f' \left(x_{S_1} \cdot \cos \varphi - z_{S_1} \cdot \sin \varphi \right)}{q + z_{S_1} \cdot \cos \varphi + x_{S_1} \cdot \sin \varphi} \\ \frac{-f' \cdot y_{S_1}}{q + z_{S_1} \cdot \cos \varphi + x_{S_1} \cdot \sin \varphi} \end{pmatrix}; \quad V'_2 = \begin{pmatrix} \frac{f' \left(x_{S_2} \cdot \cos \varphi - z_{S_2} \cdot \sin \varphi \right)}{-q + z_{S_2} \cdot \cos \varphi + x_{S_2} \cdot \sin \varphi} \\ \frac{f' \cdot y_{S_2}}{-q + z_{S_2} \cdot \cos \varphi + x_{S_2} \cdot \sin \varphi} \end{pmatrix}.$$

Поворот базового блока вокруг оси z на угол φ :

$$V'_1 = \begin{pmatrix} \frac{f' \left(x_{S_1} \cdot \cos \varphi + y_{S_1} \cdot \sin \varphi \right)}{q + z_{S_1}} \\ \frac{-f' \left(y_{S_1} \cdot \cos \varphi - x_{S_1} \cdot \sin \varphi \right)}{q + z_{S_1}} \end{pmatrix}; \quad V'_2 = \begin{pmatrix} \frac{f' \left(x_{S_2} \cdot \cos \varphi + y_{S_2} \cdot \sin \varphi \right)}{-q + z_{S_2}} \\ \frac{f' \left(y_{S_2} \cdot \cos \varphi - x_{S_2} \cdot \sin \varphi \right)}{-q + z_{S_2}} \end{pmatrix}.$$

По формулам (1)—(10) в среде MatLab проведен расчет координат изображения КЭ₁ в плоскости анализа при повороте базового блока относительно осей, параллельных осям x, y и z (рис. 3, а, б, в соответственно) неподвижной СК xyz .

Поворот базового блока осуществлялся относительно пяти точек со следующими координатами (значения координат указаны в миллиметрах): $L_{01}(0, 0, 0)$, $L_{02}(10000, 0, 0)$, $L_{03}(0, 10000, 0)$, $L_{04}(0, 0, 10000)$, $L_{05}(10000, 10000, 10000)$. Расчет произведен при следующих параметрах: заднее фокусное расстояние — 100 мм, расстояние от точки пересечения I

зеркал до точки O_c начала системы координат $x_c y_c z_c$ (см. рис. 2) — 200 мм, координаты КЭ₁ — $S_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 40000 \end{pmatrix}$.

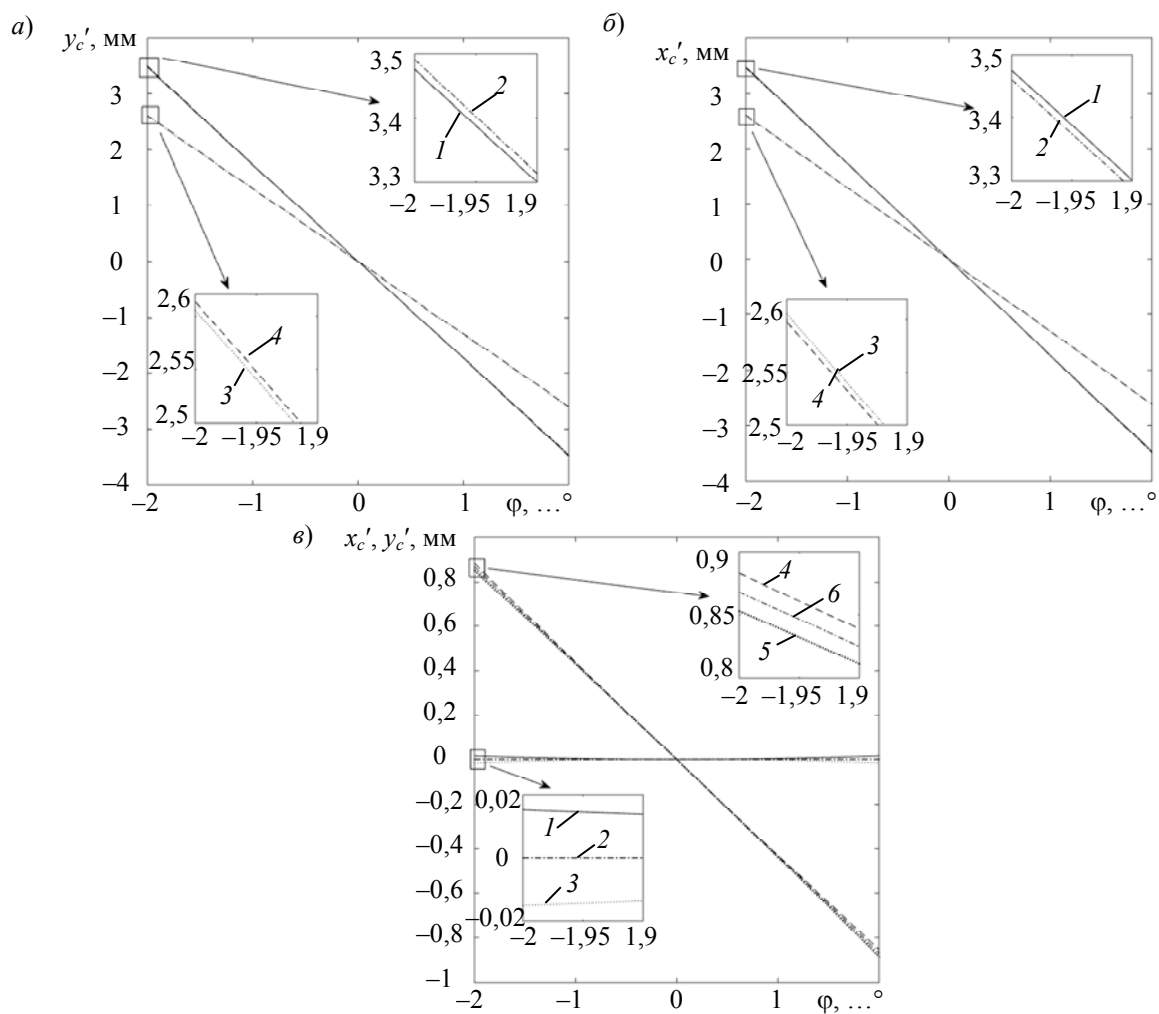


Рис. 3

В таблице представлены координаты изображения КЭ₁ (в миллиметрах) в СК $x'_c y'_c z'_c$ при повороте ББ на угол $\varphi = -2^\circ$.

Ось	Координаты изображения КЭ ₁ в плоскости анализа	L_{01} $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	L_{02} $\begin{pmatrix} 10000 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	L_{03} $\begin{pmatrix} 0 \\ 10000 \\ 0 \end{pmatrix}$	L_{04} $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 10000 \end{pmatrix}$	L_{05} $\begin{pmatrix} 10000 \\ 10000 \\ 10000 \end{pmatrix}$
x	x'_c	0	0	0	0	0
	y'_c	3,475 (рис. 3, а, график 1)	3,475 (рис. 3, а, график 1)	3,490 (рис. 3, а, график 2)	2,606 (рис. 3, а, график 3)	2,613 (рис. 3, а, график 4)
y	x'_c	3,475 (рис. 3, б, график 1)	3,460 (рис. 3, б, график 2)	3,475 (рис. 3, б, график 1)	2,606 (рис. 3, б, график 3)	2,599 (рис. 3, б, график 4)
	y'_c	0	0	0	0	0
z	x'_c	0 (рис. 3, в, график б)	0,015 (рис. 3, в, график 1)	0,868 (рис. 3, в, график 2)	0 (рис. 3, в, график б)	0,883 (рис. 3, в, график 4)
	y'_c	0 (рис. 3, в, график б)	0,868 (рис. 3, в, график 2)	-0,015 (рис. 3, в, график 3)	0 (рис. 3, в, график б)	0,853 (рис. 3, в, график 5)

Анализ графиков и таблицы показывает, что при повороте базового блока прогибомера, помимо угла поворота, на координаты изображений контрольных элементов влияет еще и точка, относительно которой поворачивается базовый блок. Например, при повороте базового блока на 2° относительно точек $L_{02}(10000, 0, 0)$ и $L_{05}(10000, 10000, 10000)$ изменение координат изображения КЭ в плоскости анализа составит около 1 мм, что в реальной системе подобного типа приведет к увеличению погрешности определения пространственных координат сложных инженерных конструкций.

Результаты представленного исследования позволяют оценить влияние поворотов базового блока на определение величины смещений элементов инженерных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джамбулатов Р. Г. Анализ причин обрушения покрытий общественных зданий // Молодой ученый. 2015. № 10. С. 197—200.
2. Терешкова А. В., Петухова И. Я. Аварии и катастрофы зданий и сооружений [Электронный ресурс]: <http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/Avarii_i_katastrofy_zdaniy_i_sooruzheniy.pdf>.
3. Смирнов А. Г. Анализ причин аварий плавучих доков // Судостроение. 2001. № 3. С. 45—47.
4. Антоненко С. В., Линник Е. В., Голобокова Н. Ю., Рыбалкин Ю. Г. Обеспечение эксплуатационной надежности плавучих доков // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № S2. С. 4—8.
5. А.с. 1652819 СССР, МКИ G 01 b 21/00. Оптико-электронное устройство для определения линейных смещений объекта / Ю. Г. Курчин, И. Л. Метте, А. Н. Тимофеев. Оpubл. 30.05.91. Бюл. № 20.
6. Korotaev V. V., Pantyushin A. V., Serikova M. G., Anisimov A. G. Deflection measuring system for floating dry docks // Ocean Engineering. 2016. Vol. 117. P. 39—44. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012.
7. Konyakhin I. A., Petrochenko A. V., Tolochek N. S. Optic-electronic systems for measurement a position of radio-telescope components // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9446. P. 94460M. DOI: 10.1117/12.2087605.
8. Pantyushin A. V., Serikova M. G., Timofeev A. N. Optoelectronic system for monitoring displacements, based on LED fiducial marks // J. of Optical Technology. 2009. Vol. 76, N 8. P. 507—510. DOI: 10.1364/JOT.76.000507.
9. Пат. 2445572 РФ, МПК5 G 01 B 11/16, G 01 B 21/32. Устройство для контроля деформаций протяженного объекта / В. В. Коротаев, А. Н. Тимофеев, А. А. Горбачёв, А. В. Пантюшин, А. М. Алеев, Е. С. Кулешова. Оpubл. 20.03.2012. Бюл. № 8.
10. Gorbachev A. A., Pantyushin A. V., Serikova M. G., Korotaev V. V., Timofeev A. N. System for deflection measurements of floating dry docks // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 95254. P. 95254C. DOI: 10.1117/12.2184925.
11. Тимошук И. Н., Сухопаров С. А. Инвариантные преобразования в оптике // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2002. Вып. 5. С. 8—13.
12. Бурбаев А. М., Леонтьева А. И., Одиноких Г. А., Френкель Д. А. Применение инвариантных оптических систем в схемах контроля и юстировки ОЭП // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 72—79.
13. Горбачёв А. А. Инвариантность в оптических схемах оптико-электронных систем контроля прогиба // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 30. С. 91—96.
14. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
15. Koniakhin I. A., Gorbachev A. A., Timofeev A. N., Musiakov V. L. Study of the structural features of invariant optoelectronic systems with a unified matrix analysis field // J. of Optical Technology. 2007. Vol. 74. N 12. P. 810—814.
16. Gorbachev A. A., Hoang A. P. Invariant electro-optical system for deflection measurement of floating docks // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10329. P. 103294F.
17. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2004. 926 с.
18. Грейм И. А. Зеркально-призменные системы. М.: Машиностроение, 1981. 125 с.

Сведения об авторах

- Хоанг Ань Фьонг** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: hoanglaogia_2508@mail.ru
- Алексей Александрович Горбачёв** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: gorbachev@corp.ifmo.ru
- Сергей Васильевич Михеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: serg7uz@mail.ru
- Максим Андреевич Клещенко** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: mkleshchenok@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию
20.08.18 г.

Ссылка для цитирования: Хоанг Ань Фьонг, Горбачёв А. А., Михеев С. В., Клещенко М. А. Анализ влияния поворота базового блока прогибомера на определение координат изображений контрольных элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 9. С. 805—813.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF DEFLECTOMETER BASE UNIT ROTATION ON DETERMINATION OF IMAGE COORDINATES OF REFERENCE ELEMENTS

Hoang Anh Phuong, A. A. Gorbachev, S. V. Mikheev, M. A. Kleshchenok

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: gorbachev@corp.ifmo.ru

An optoelectronic system for determining the spatial position of complex engineering structures is considered. The influence of the optoelectronic system rotation on the error in measuring displacement of reference element is analyzed. Using vector algebra and matrix analysis, a method is proposed for determining the effect of the angle of rotation of the optoelectronic system basic block and direction of the rotation axis on the coordinates of the images of reference elements located at the points of measurement of spatial coordinates of the engineering structure. Calculating the reference element image coordinates in the plane under analysis, performed in the MatLab environment for the given turning points, shows that the result of operation of such optoelectronic systems is affected not only by the angle of rotation, but also by the point at which the system rotates.

Keywords: optical-electronic deflectometer, deflection, control element, analysis field, beam deflection system, invariant system, vector analysis

REFERENCES

1. Dzhambulatov R.G. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 10, pp. 197–200. (in Russ.)
2. http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/Avarii_i_katastrofy_zdaniy_i_sooruzheniy.pdf. (in Russ.)
3. Smirnov A.G. *Sudostroenie*, 2001, no. 3, pp. 45–47. (in Russ.)
4. Antonenko S.V., Linnik E.V., Golobokova N.Yu., Rybalkin Yu.G. *Marine intelligent technologies*, 2013, no. S2, pp. 4–8. (in Russ.)
5. Copyright certificate 1652819 USSR, G 01 b 21/00, *Optiko-elektronnoye ustroystvo dlya opredeleniya lineynykh smeshcheniy ob'yekta* (The Optical-Electronic Device for Determination of Linear Shifts of an Object), Yu.G. Kirchin, I.L. Mette, A.N. Timofeyev, Published 30.05.91, Bulletin 20. (in Russ.)
6. Korotaev V.V., Pantyushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. *Ocean Engineering*, 2016, no. 117, pp. 39–44. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
7. Konyakhin I.A., Petrochenko A.V., Tolochev N.S. *Proc. of SPIE*, 2015, no. 9446, pp. 94460M. DOI: 10.1117/12.2087605
8. Pantyushin A.V., Serikova M.G., Timofeev A.N. *Journal of Optical Technology*, no. 8(76), pp. 507–510. DOI: 10.1364/JOT.76.000507
9. Patent 2445572 RU, G 01 B 11/16, G 01 B 21/32, *Ustroystvo dlya kontrolya deformatsiy protyazhennogo ob'yekta* (The Device for Control of Deformations of the Extended Object), V.V. Korotayev, A.N. Timofeyev, A.A. Gorbachev, A.V. Pantyushin, A.M. Alejev, E.S. Kuleshova, Patent application no. 2010145639/28, Published 20.03.2012, Bulletin 8. (in Russ.)
10. Gorbachev A.A., Pantyushin A.V., Serikova M.G., Korotaev V.V., Timofeev A.N. *Proc. of SPIE*, no. 95254, pp. 95254C. DOI: 10.1117/12.2184925
11. Timoshchuk I.N., Sukhoparov S.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2002, pp. 8–13. (in Russ.)
12. Burbayev A.M., Leont'yeva A.I., Odinokikh G.A., Frenkel' D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 11(54), pp. 72–79.

13. Gorbachev A.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, pp. 91–96. (in Russ.)
14. Pogarev G.V. *Yustirovka opticheskikh priborov* (Adjustment of Optical Devices), Leningrad, 1982, 237 p. (in Russ.)
15. Koniakhin I.A., Gorbachev A.A., Timofeev A.N., Musiakov V.L. *Journal of Optical Technology*, 2007, no. 12(74), pp. 810–814
16. Gorbachev A.A., Hoang A.P. *Proc. of SPIE*, 2017, no. 10329, pp. 103294F.
17. Forsyth D.A., Ponce J. *Computer Vision: A Modern Approach*, Pearson Education, Prentice Hall, 2012, 793 p.
18. Greym I.A. *Zerkal'no-prizmennyye sistemy* (Mirror and Prismatic Systems), Moscow, 1981, 125 p. (in Russ.)

Data on authors

Hoang Anh Phuong	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: hoanglaogia_2508@mail.ru
Alexey A. Gorbachev	—	PhD; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: gorbachev@corp.ifmo.ru
Sergey V. Mikheev	—	PhD; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: serg7uz@mail.ru
Maksim A. Kleshchenok	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: mkleshchenok@corp.ifmo.ru

For citation: Hoang Anh Phuong, Gorbachev A. A., Mikheev S. V., Kleshchenok M. A. Analysis of the effect of deflectometer base unit rotation on determination of image coordinates of reference elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 9. P. 805—813 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-805-813