

структуры дрейфующей сети, при котором все дискретные объекты «подхватываются» структурой сети на $k+1$ -м интервале. При этом, однако, возможна ситуация, когда оперативная сеть оказывается несвязной, что, в свою очередь, может привести к еще большим потерям транспортного ресурса.

Список использованных источников

1. Игнатъева А.В., Максимцов М.М. Исследование систем управления. – М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2003. – 62 с.
2. Власов М.П., Шимко П.Д. Моделирование экономических процессов. – М.: Наука. 2005. – 154 с.
3. Багриновский К.А., Левинсон М.Р. Имитационные модели для принятия управленческих решений. - М.: Наука, 1989.-245 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДВИЖЕНИЯ

В.Н. Нестеров

Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара

1. Концепция векторной многокомпонентной физической величины

При исследовании параметров движения или деформаций сложных механических систем, таких как газотурбинный двигатель или универсальный промышленный робот, а также в задачах определения компонентов сложных перемещений подвижных целей большое значение приобретают вопросы выбора расчетной и измерительной моделей объекта [1-6]. Упрощенное его представление в виде некоторой идеализированной системы-модели, поддающейся расчетному анализу, не является однозначным. Характер моделей зависит от объема информации, которую необходимо получить в процессе анализа свойств проектируемого или исследуемого действующего объекта. Сложность моделей определяется количеством факторов, учитываемых при формировании модели. Эти факторы определяются конструктивными особенностями конкретного исследуемого объекта, режимами его работы и характером движения.

Если исследуемые явления или объекты имеют сложный характер или структуру и (или) характеризуются сложными траекториями движения, то физические величины, в частности перемещения и деформации, их отражающие, сами характеризуются определенной структурой, элементы которой связаны между собой каким-либо образом, находятся во взаимодействии, оказывают взаимное влияние друг на друга и несут

дополнительную информацию об исследуемом явлении или объекте. Такие величины, несущие в некоторой интегральной форме информацию о составляющих их элементах - также физических величинах (перемещениях и деформациях), получили название многокомпонентных, а их составляющие - информативных компонентов или просто компонентов [7]. Примерами многокомпонентных физических величин служат перемещения элементов конструкций газотурбинных двигателей, звеньев манипуляторов универсальных промышленных роботов и т.д., являющиеся следствием проявления многих факторов, каждый из которых, а также их соотношения представляют интерес. Поскольку сами по себе механические системы рассредоточены в трехмерном пространстве, для описания сложных перемещений и деформаций элементов конструкции таких объектов используется термин «многомерные». Анализ многочисленных публикаций показывает, что в качестве элементов многомерных перемещений и деформаций рассматриваются их проекции на соответствующие координатные оси. В этом смысле перемещение одномерного объекта, т.е. объекта, имеющего размерность в направлении одной единственной координатной оси, является одномерной величиной. Тем не менее, эта одномерная величина будет являться многокомпонентной, если результирующее перемещение является следствием ряда перемещений и деформаций элементов объекта, имеющих в качестве своих причин различные источники, представляющие, в свою очередь, существенный интерес. Соответственно, отдельные составляющие таких многокомпонентных физических величин носят информативный характер и могут являться измеряемыми величинами.

С целью формализации измерительной задачи автором предложена концепция векторной многокомпонентной физической величины, которая базируется на следующих трех основных положениях [1,2,7]:

- 1) векторные многокомпонентные физические величины рассматриваются как функции множества составляющих их информативных компонентов;
- 2) функции связи названных информативных компонентов в моделях многокомпонентных физических величин определяются законами векторной алгебры;
- 3) информационные модели векторных многокомпонентных физических величин допускают многовариантность представления указанных информативных составляющих в зависимости от объекта исследования и поставленной задачи.

2. Модели векторной многокомпонентной физической величины

В общем случае информационную модель векторной многокомпонентной физической величины X , отражающую

многокомпонентные процессы движения в трехмерном пространстве, можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1x}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{px}(\mathbf{r}, \tau)); \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1y}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{py}(\mathbf{r}, \tau)); \\ \mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1z}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{pz}(\mathbf{r}, \tau)), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau)$, $\mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau)$, $\mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau)$ - проекции векторной многокомпонентной физической величины $\mathbf{X}(\mathbf{r}, \tau)$ на оси декартовой системы координат; \mathbf{r} - радиус-вектор от начала базовой системы координат до контролируемой точки исследуемого объекта; τ - время; $\mathbf{x}_{1s}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{ps}(\mathbf{r}, \tau)$ - информативные компоненты s -й ($s \in \{x, y, z\}$) координатной составляющей векторной многокомпонентной физической величины $\mathbf{X}(\mathbf{r}, \tau)$; p - количество информативных компонентов многокомпонентного перемещения; \mathbf{F} - векторная функция связи компонентов $\mathbf{x}_{1s}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{ps}(\mathbf{r}, \tau)$, определяемая физикой исследуемого объекта или процесса.

Если рассматривать проекции информативных составляющих сложных перемещений объектов на соответствующие координатные оси, то модель (1) может быть представлена в виде векторной суммы соответствующих информативных компонентов:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jx}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jy}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jz}(\mathbf{r}, \tau). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jx}(\mathbf{r}, \tau)$, $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jy}(\mathbf{r}, \tau)$, $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jz}(\mathbf{r}, \tau)$ - векторные суммы информативных компонентов координатных составляющих многокомпонентной физической величины $\mathbf{X}(\mathbf{r}, \tau)$.

Разновидностью трехмерных моделей (1) и (2) являются плоские модели, представляющие собой отображение трехмерных моделей на плоскую поверхность, например, в результате моделирования оптического преобразования:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1x}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{px}(\mathbf{r}, \tau)) \right\}; \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1y}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{py}(\mathbf{r}, \tau)) \right\}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \sum_{j=1}^r \mathbf{x}_{jx}(\mathbf{r}, \tau) \right\}; \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jy}(\mathbf{r}, \tau) \right\}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где σ - коэффициент масштабирования, позволяющий перейти от реальных координат объекта к координатам его изображения, например, на чувствительной поверхности видеокамеры.

3. Проблема оптических измерений

При решении обратной задачи восстановления координат реальных объектов и параметров их движения по плоским изображениям возникают существенные проблемы. Рассмотрим процесс формирования изображения трехмерного объекта на поверхность плоскости изображения видеокамеры, показанный на рис. 1. В этом случае плоскость изображения совпадает с плоскостью x, y системы координат видеокамеры $\{o, x, y, z\}$, которая совмещена с базовой неподвижной системой координат $\{O, X, Y, Z\}$.

Оптическая ось, проходящая через центр линзы, направлена вдоль оси z . Центр плоскости изображения совпадает с началом системы координат видеокамеры, а центр линзы имеет координаты $(0, 0, \lambda)$. Если камера сфокусирована на контролируемом объекте, то λ является фокусным расстоянием линзы. Для всех точек контролируемого пространства: $Z > \lambda$. Координаты точки $m(x, y)$, являющейся проекцией на плоскость изображения точки $M(X, Y, Z)$ тела в трехмерном пространстве, определяются непосредственно из уравнений [8]:

$$x = \lambda X / (\lambda - Z), \quad y = \lambda Y / (\lambda - Z). \quad (5)$$

Данными выражениями можно пользоваться для перехода от декартовых координат точки $M(X, Y, Z)$ к координатам точки изображения $m(x, y)$. Обратный переход от координат точки $m(x, y)$ к координатам точки $M(X, Y, Z)$:

$$X = x / \lambda (\lambda - Z), \quad Y = y / \lambda (\lambda - Z) \quad (6)$$

является математически некорректной задачей, поскольку нарушается второе условие корректности по Адамару [9].

Действительно, в соответствии с (6) однозначное восстановление координат точки $M(X, Y, Z)$ по координатам ее изображения $m(x, y)$ невозможно, поскольку любая точка, лежащая на прямой, проведенной через точки $m(x, y)$ и $(0, 0, \lambda)$, проецируется в точку изображения $m(x, y, 0)$. Из (6) очевидно, проблема может быть решена заданием координаты Z .

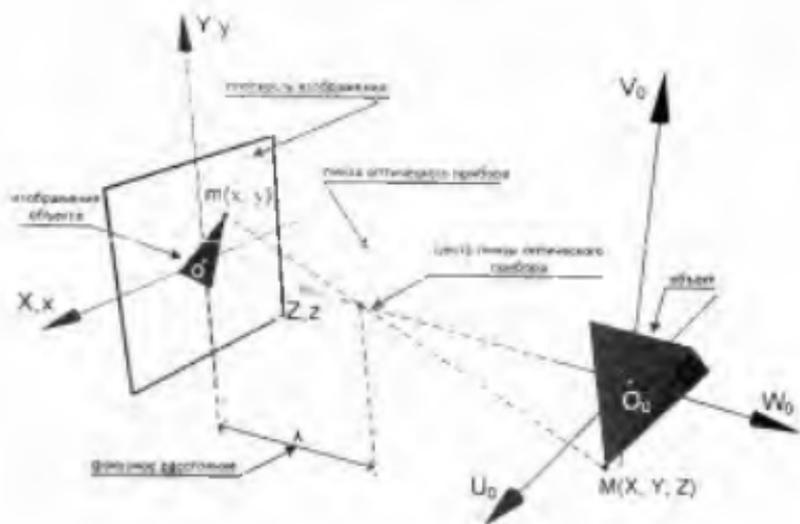


Рис. 1. Формирование изображения трехмерного объекта на чувствительной плоскости видеокамеры

В технических приложениях эта задача обычно решается использованием бинокулярного зрения [8]. Такое решение содержит аппаратную избыточность, может привести к увеличению суммарной погрешности измерения и требует разработки дополнительных методик. В частности, операция калибровки стерео зрения состоит из двух этапов: калибровки индивидуальных камер и калибровки комбинации двух камер [10,11].

4. Теоретические основы оптических измерений

Целью является разработка информационно наполненных математических моделей изображений сложных перемещений подвижных объектов, отражающих действие различных источников и позволяющих решить проблему восстановления реальных координат подвижных объектов

В соответствии с исходной постановкой задачи и основным методическим признаком для обеспечения восстановления информативных составляющих сложных перемещений контролируемого объекта в реальном пространстве на нем создается распределенный в пространстве контрольный объект, обладающий известными с высокой точностью геометрическими параметрами, которые используются в качестве мер. Совокупность указанных мер, объединенных в многомерном контрольном объекте, представляет собой многомерный тест. А метод, основанный на использовании многомерных тестов для определения информативных составляющих многокомпонентных перемещений контролируемых объектов, получил название метода многомерных тестов или многомерных тестовых объектов [12,13].

Особенность метода в том, что, с одной стороны, компоненты многомерного теста отражают многомерность контролируемых перемещений, а с другой – функционально связаны с соответствующими информативными составляющими перемещений, подлежащими определению. Проводя аналогию между составляющими многомерного теста и составляющими сложных перемещений, в рамках общей концепции векторной многокомпонентной физической величины меры многомерных тестов или их проекции на координатные оси рассматриваются как многокомпонентные величины – многокомпонентные тесты, составляющие которых также являются векторными величинами. Соответственно, общая методика формирования многомерных тестов и функции связи их компонентов с измеряемыми величинами подпадают под основные положения названной концепции и могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) многомерные многокомпонентные тесты рассматриваются как функции множества составляющих их компонентов;
- 2) функции связи названных компонентов в моделях многокомпонентных тестов определяются законами векторной алгебры;
- 3) модели векторных многомерных многокомпонентных тестов допускают многовариантность представления указанных составляющих в зависимости от решаемой задачи.

Опираясь на сформулированные положения и базовую модель (1), представим в общем виде модель проекций на координатные оси декартовой системы координат векторной величины X , характеризующей многокомпонентные перемещения контролируемого объекта и включающей в себя составляющие проекций многомерного многокомпонентного теста на соответствующие координатные оси:

$$\left. \begin{aligned} X_x(r, \tau) &= F(x_{1x}(r, \tau), \dots, x_{px}(r, \tau), L_{1x}, \dots, L_{qx}); \\ X_y(r, \tau) &= F(x_{1y}(r, \tau), \dots, x_{py}(r, \tau), L_{1y}, \dots, L_{qy}); \\ X_z(r, \tau) &= F(x_{1z}(r, \tau), \dots, x_{pz}(r, \tau), L_{1z}, \dots, L_{qz}). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $X_x(r, \tau)$, $X_y(r, \tau)$, $X_z(r, \tau)$ – проекции многокомпонентного перемещения $X(r, \tau)$ на оси декартовой системы координат; r – радиус-вектор от начала базовой системы координат до контролируемой точки исследуемого объекта; τ – время; $x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau)$ – информативные компоненты S -й ($S \in \{x, y, z\}$) координатной составляющей многокомпонентного перемещения $X(r, \tau)$; p – количество информативных компонентов многокомпонентного перемещения; L_{1s}, \dots, L_{qs} – компоненты S -й координатной составляющей L_s многомерного теста L ; q – количество

компонентов S -й координатной составляющей L_s многомерного теста L ; F функция связи компонентов $x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau)$ и L_{1s}, \dots, L_{qs} координатной составляющей L_s многомерного теста L .

В соответствие с положениями метода [12] для определения информативных компонентов $x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau)$ S -й координатной составляющей многокомпонентного перемещения $X(r, \tau)$ необходимо создание n измерительных каналов:

$$\left. \begin{aligned} Y_1(r, \tau) &= \Psi_1 \{F_1 \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\}\}, \\ &\dots \\ Y_n(r, \tau) &= \Psi_n \{F_p \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\}\}, \end{aligned} \right\} (n \geq p \geq 2), \quad (8)$$

где $Y_1(r, \tau), \dots, Y_n(r, \tau)$ функции перемещений i -й точки изображения контролируемого объекта относительно выбранной на изображении метки;

$F_1 \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\}, \dots, F_p \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\}$ - векторные функции множества составляющих их информативных компонентов $x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau)$, подлежащих определению, и компонентов L_{1s}, \dots, L_{qs} S -й координатной составляющей L_s многомерного теста L .

Условием существования искомых измерительно-вычислительных алгоритмов

$$\left. \begin{aligned} x_{1s}(r, \tau) &= f_1 \{Y_1(r, \tau), \dots, Y_n(r, \tau)\}; \\ &\dots \\ x_{ps}(r, \tau) &= f_p \{Y_1(r, \tau), \dots, Y_n(r, \tau)\}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

является тождественное неравенство нулю якобиана:

$$\det \left[\frac{\partial Y_i}{\partial x_{js}} \right] \neq 0 \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, p} \quad (10)$$

Последнее обеспечивается реализацией «асимметрии» $Y_1(r, \tau), \dots, Y_n(r, \tau)$ относительно компонентов $x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau)$ и L_{1s}, \dots, L_{qs} , выражающейся следующим неравенством:

$$F_1 \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\} \neq \dots \neq F_p \{x_{1s}(r, \tau), \dots, x_{ps}(r, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs}\}. \quad (11)$$

Выполнение (11) наряду с (8) является необходимым признаком реализации метода многомерных тестовых объектов, разновидности реализаций которого обуславливаются видом функций

$$F_s \{ \mathbf{x}_{1s}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{ps}(\mathbf{r}, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs} \} \quad (12)$$

связи, подлежащих определению информативных компонентов $\mathbf{x}_1(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{ps}(\mathbf{r}, \tau)$ и компонентов L_{1s}, \dots, L_{qs} s -й координатной составляющей L_s многомерного теста L .

В соответствие с положениями концепции векторной многокомпонентной физической величины и методикой формирования многомерного многокомпонентного теста функции связи (11) могут быть представлены в виде следующей универсальной модели:

$$F_{is} \{ \mathbf{x}_{1s}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{ps}(\mathbf{r}, \tau), L_{1s}, \dots, L_{qs} \} = \sum_s^{\{x,y,z\}} \sum_{u=1}^q v_{ius} L_{iux} + \sum_s^{\{x,y,z\}} \sum_{j=1}^p \eta_{ijs} x_{ijs}(\mathbf{r}, \tau) \quad (13)$$

где i - порядковый номер функции связи в системе (8); u - порядковый номер компонентов многокомпонентного теста L_{iux} ; $s \in \{x, y, z\}$

множество координатных составляющих; j - порядковый номер

информативных компонентов s -й координатной составляющей

многокомпонентного перемещения $X_s(\mathbf{r}, \tau)$; $v_{ius} \in [0, 1]$ весовые

коэффициенты, отражающие отсутствие - 0 или наличие соответствующей

части - $[0, 1]$ соответствующей компоненты многокомпонентного теста L_{iux} в

модели (13); $\eta_{ijs} \in \{0, 1\}$ весовые коэффициенты, отражающие отсутствие

- 0 или наличие - 1 соответствующей информативной компоненты $x_{ijs}(\mathbf{r}, \tau)$ в

модели (13).

Используя (13), представим модель (7) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{ix}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q v_{iux} L_{iux} + \sum_{j=1}^p \eta_{ijx} x_{ijx}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_{iy}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q v_{iuy} L_{iuy} + \sum_{j=1}^p \eta_{ijy} x_{ijy}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_{iz}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q v_{iuz} L_{iuz} + \sum_{j=1}^p \eta_{ijz} x_{ijz}(\mathbf{r}, \tau), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где вектора L_{iux} , L_{iuy} , L_{iuz} , x_{ijx} , x_{ijy} , x_{ijz} определены в одномерных пространствах совпадающих с соответствующими осями декартовой системы координат.

Такое представление многокомпонентных перемещений позволяет ввести процедуру формального генерирования функций

$Y_1(\mathbf{r}, \tau) \dots Y_n(\mathbf{r}, \tau)$ перемещений i -й точки изображения контролируемого объекта относительно выбранной на изображении метки в системе (8). Формальная процедура обеспечивается введением комбинационных коэффициентов в моделях многокомпонентных физических величин (14) и позволяет процесс генерирования уравнений в системе (8) и, соответственно, процесс поиска измерительно-вычислительных алгоритмов для определения искомым информативных составляющих многокомпонентных перемещений осуществлять в автоматизированном режиме.

Обозначим названные комбинационные коэффициенты, учитывающие направления векторов L_{iuc} и x_{ijs} в пространстве соответствующих координатных осей или их отсутствие, как $\xi_{iuc}, \zeta_{ijs} \in \{0, 1, -1\}$. Тогда, переходя от векторной модели (14) к скалярной, получаем:

$$\left. \begin{aligned} X_{ix}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q \xi_{iux} v_{iux} L_{iux} + \sum_{j=1}^p \zeta_{ijx} \eta_{ijx} x_{ijx}(\mathbf{r}, \tau); \\ X_{iy}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q \xi_{iuy} v_{iuy} L_{iuy} + \sum_{j=1}^p \zeta_{ijy} \eta_{ijy} x_{ijy}(\mathbf{r}, \tau); \\ X_{iz}(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{u=1}^q \xi_{iuz} v_{iuz} L_{iuz} + \sum_{j=1}^p \zeta_{ijz} \eta_{ijz} x_{ijz}(\mathbf{r}, \tau), \end{aligned} \right\} (15)$$

где

$$\xi_{iuk}, \zeta_{ijk} = \begin{cases} +1, & \text{если проекции векторов } L_{iuk}, x_{ijk} \text{ совпадают с} \\ & \text{направлением соответствующей оси координат,} \\ -1, & \text{если проекции векторов } L_{iuk}, x_{ijk} \text{ не совпадают с} \\ & \text{направлением соответствующей оси координат,} \\ 0, & \text{если соответствующая компонента отсутствует.} \end{cases} (16)$$

В соответствие с методическими требованиями и учетом моделей (4) и (15) система уравнений для изображений компонентов перемещений и составляющих многомерных тестов на чувствительной плоскости приемника изображения записывается в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Y_1(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \sum_x \sum_{u=1}^q \xi_{iux} v_{iux} L_{iux} + \sum_x \sum_{j=1}^p \zeta_{ijx} \eta_{ijx} x_{ijx}(\mathbf{r}, \tau) \right\}; \\ &\dots \\ Y_n(\mathbf{r}, \tau) &= \sigma \left\{ \sum_x \sum_{u=1}^q \xi_{iux} v_{iux} L_{iux} + \sum_x \sum_{j=1}^p \zeta_{ijx} \eta_{ijx} x_{ijx}(\mathbf{r}, \tau) \right\}, \end{aligned} \right\} n = p + 1, (17)$$

5. Пример реализации метода

Рассмотрим графическую модель сложных перемещений подвижного объекта, представленную на рис. 2. С перемещающимся объектом совмещен тестовый объект ABCD с известными параметрами L_x и L_y . В начальный момент времени тестовый объект обозначен $A_0B_0C_0D_0$, его центр O_0 совпадает с началом системы координат $\{O_0, X_0, Y_0, Z_0\}$, а его стороны A_0B_0 и C_0D_0 совпадают, соответственно, с координатными осями O_0X_0 и O_0Y_0 . Начальное положение объекта обозначено цифрой 1. В конечном положении, обозначенном цифрой 5, тестовый объект обозначен $A_4B_4C_4D_4$. Осуществив декомпозицию результирующего перемещения тестового объекта из положения 1 в положение 5 на информативные составляющие, можем перейти к следующему этапу методики.

Для удобства описания используем присоединенную к тестовому объекту систему координат $\{O_i, U_i, V_i, W_i\}$. Компоненты результирующего перемещения удобно представить в виде матриц перехода от присоединенной к тестовому объекту системы координат в каждом из положений объекта: начальном, промежуточных и конечном:

$$\{O_0, U_0, V_0, W_0\} \rightarrow \dots \rightarrow \{O_i, U_i, V_i, W_i\} \rightarrow \dots \rightarrow \{O_4, U_4, V_4, W_4\}.$$

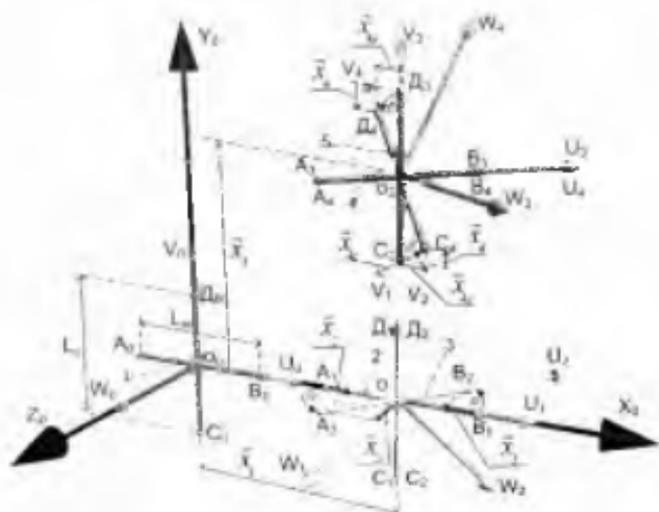


Рис. 2. Графическая модель перемещения тестового объекта ABCD L_x, L_y - известные параметры тестового объекта; 1,2,3,4,5 - положения тестового объекта, полученные путем декомпозиции результирующего перемещения; x_1, x_2, x_3, x_4 - информативные компоненты результирующего перемещения тестового объекта.

Тогда переход тестового объекта из положения 1 в положение 5 можем представить преобразованием системы координат $\{O_0, U_0, V_0, W_0\}$ в систему координат $\{O_4, U_4, V_4, W_4\}$ путем:

перехода из системы координат $\{O_0, U_0, V_0, W_0\}$ в систему координат $\{O_1, U_1, V_1, W_1\}$ смещением первой в направлении оси O_0X_1 на величину x_1 ;

- перехода из системы координат $\{O_1, U_1, V_1, W_1\}$ в систему координат $\{O_2, U_2, V_2, W_2\}$ поворотом вокруг оси O_1V_1 на угол α ;

перехода из системы координат $\{O_2, U_2, V_2, W_2\}$ в систему координат $\{O_3, U_3, V_3, W_3\}$ смещением ее в направлении оси O_1V_2 на величину x_3 ;

- перехода из системы координат $\{O_3, U_3, V_3, W_3\}$ в систему координат $\{O_4, U_4, V_4, W_4\}$ поворотом первой вокруг оси O_2U_3 на угол β .

Однородные матрицы перехода, описывающие названные перемещения, имеют следующий вид:

$$T_{U_0, x_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$T_{V_1, \alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$T_{V_2, x_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$T_{U_3, \beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

Матрица (19) описывает компоненту, характеризующую поступательное перемещение объекта в направлении оси O_0X_0 (вектор

перемещения x_1). Матрица (20) описывает компоненту, характеризующую поворот объекта вокруг оси O_1V_1 (угол поворота α). Матрица (21) описывает компоненту, характеризующую поступательное перемещение объекта в направлении оси O_0Y_0 (вектор перемещения x_3). Матрица (22) описывает компоненту, характеризующую поворот объекта вокруг оси O_2U_3 (угол поворота β).

Соответственно однородная матрица композиции преобразований, описывающая результирующее перемещение объекта ABCD из положения 1 в положение 5, записывается в виде:

$${}^1T_5 = T_{U_0, x_1} T_{V_1, \alpha} T_{V_2, x_3} T_{U_2, \beta}, \quad (23)$$

где каждая из матриц перехода несет информацию о соответствующих информативных составляющих сложного перемещения объекта ABCD.

В общем случае, перемещающийся объект имеет шесть степеней свободы. Соответственно, в однородной матрице композиции преобразований будет представлено шесть матриц перехода на каждом такте измерения. Например:

$${}^1T_7 = T_{U_1, x_1} T_{V_1, \alpha} T_{V_2, x_2} T_{U_2, \beta} T_{W_3, x_3} T_{W_3, \beta}. \quad (24)$$

В каждом конкретном случае модель должна строиться исходя из специфики решаемой задачи.

Переходя от реального объекта ABCD к его изображению в системе машинного зрения, мы переходим от пространственных координат точек (X, Y, Z) контролируемого объекта к их двумерным изображениям, где для обозначения координат пикселя используется сокращенная запись (x, y) .

Рассмотрим задачу определения информативных компонентов, описанных однородной матрицей композиции преобразований (23) для перемещения объекта ABCD из положения 1 в положение 5, показанного на рис. 2. В соответствие с принятыми обозначениями вектора x_1 и x_3 , характеризующие линейные перемещения соответствующих точек объекта ABCD в направлениях осей O_0X_0 и O_1V_1 , отображаются на плоскость x_1y_1 изображения камеры непосредственно. Вектора x_2 и x_4 , отображаемые на плоскость изображения камеры, характеризуют перемещения соответствующих точек контролируемого объекта ABCD вследствие его поворота вокруг осей O_1V_1 и O_2U_3 на углы α и β . Поскольку параметры L_1 и L_2 многомерного тестового объекта известны, то переход от x_2 и x_4 к углам α и β является тривиальной задачей и в дальнейшем не рассматривается.

Приведенное (дважды инвертированное изображение) отображение последовательности соответствующих положений $(a_0b_0c_0d_0, a_1b_1c_1d_1, a_2b_2c_2d_2, a_3b_3c_3d_3)$ контролируемого объекта ABCD на плоскость изображения камеры показано на рис. 3.

Согласно положениям способа измерения [13] в определенных точках плоскости изображения закрепляются виртуальные метки, связанные

с системой координат X, Y камеры. относительно которых и определяются результирующие перемещения точек контролируемого объекта. В данном случае метками являются точки M_1, M_2, M_3, M_4 , расположенные на соответствующих координатных осях камеры. В начальный момент времени положение метки M_1 совпадает с положением точки a_0 , положение метки M_2 совпадает с положением точки o_0 , положение метки M_3 совпадает с положением точки b_0 , положение метки M_4 совпадает с положением точки c_0 .

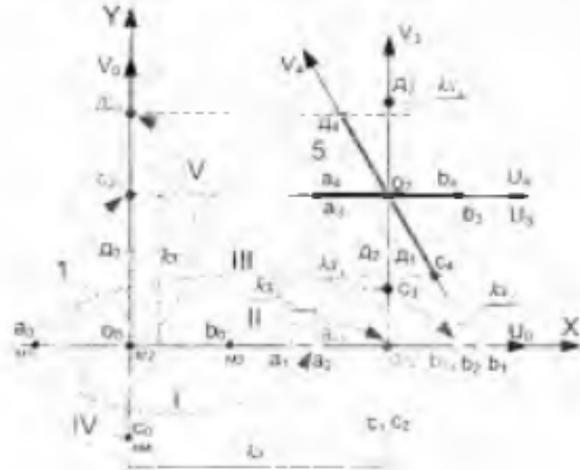


Рис. 3. Дважды инвертированное изображение $abcd$ объекта $ABCD$ фиксируемое видеокамерой и отображающее последовательность положений изображения контролируемого объекта

На рис. 3 показаны также вектора kx_1, kx_2, kx_3, kx_4 , являющиеся изображениями проекций информативных составляющих.

В соответствие с (17) можем записать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= k(x_1 + x_2); \\ Y_2 &= k(-L_x/2 + x_1); \\ Y_3 &= k(L_x + x_1 - x_2); \\ Y_4 &= k(L_y/2 + x_3); \\ Y_5 &= k(L_y/2 + x_3 - x_4), \end{aligned} \right\} (25)$$

где Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 — изображения многокомпонентных перемещений соответствующих точек контрольного объекта, отсчитываемых от меток M_1, M_2, M_3 и M_4 в направлениях, показанных на рис. 3 стрелками; L — приведенная к скалярной модели компонента многомерного теста L .

В соответствие с (10) определим якобиан для системы уравнений (25):

$$Ja = 2k^4 L_x.$$

Поскольку для оптического преобразователя $k \neq 0$, а $L_x \neq 0$ по определению многомерного теста, то $J_a = 2k^4 L_x \neq 0$, и система уравнений (25) разрешима относительно информативных компонентов x_1, x_2, x_3, x_4 . Соответственно, измерительно-вычислительные алгоритмы для определения составляющих перемещения объекта ABCD, описанных однородной матрицей композиции преобразований (23) и показанных на рис 2, имеют вид.

$$x_1 = \frac{L_x (Y_1 + Y_3 + 2Y_2)}{2 (Y_1 + Y_3 - 2Y_2)} \quad (26)$$

$$x_2 = \frac{L_x (3Y_1 - 2Y_2 - Y_3)}{2 (Y_1 + Y_3 - 2Y_2)} \quad (27)$$

$$x_3 = L_x \frac{2Y_4}{Y_1 + Y_3 - 2Y_2} - \frac{L_y}{2} \quad (27)$$

$$x_4 = L_x \frac{2(Y_4 - Y_5)}{Y_1 + Y_3 - 2Y_2} \quad (28)$$

Полученные измерительно-вычислительные алгоритмы позволяют восстановить координаты перемещающегося в реальном пространстве объекта по его плоским изображениям.

Вернувшись к методике синтеза измерительно-вычислительных алгоритмов и анализируя на этой основе полученное решение, можем сделать вывод о многовариантности решения данной задачи на основе изложенного в работе метода многомерных тестовых объектов. Это следует из формального аппарата комбинирования $v_{ijs}, \eta_{ijs}, \xi_{ijs}, \zeta_{ijs}$ и показателей p и q в системе уравнений (17). Количество уравнений в системе (17) и их вид определяются в процессе решений конкретной задачи и зависят как от числа информативных компонентов, подлежащих определению, так и от критерия качества, формируемого в процессе постановки решаемой задачи.

Комбинационный аппарат формального синтеза измерительно-вычислительных алгоритмов для определения составляющих многокомпонентных перемещений является перспективным с точки зрения автоматизированного синтеза вариантов, приемлемых при решении конкретных измерительных задач.

Следует подчеркнуть необходимость и актуальность в ближайшей перспективе постановки и решения задачи выбора из множества физически реализуемых измерительно-вычислительных алгоритмов в пределах задач каждого класса, определяемого количеством и качеством информативных компонентов контролируемых перемещений, а также количеством и качеством информативных компонентов многомерного теста. В отдельный

вопрос следует выделить задачу генерирования многомерных тестов, исследования влияния их вида, количества и оптимизации тестовых составляющих, как в общетеоретическом аспекте, так и для решения конкретных практических задач.

Список использованных источников

1. Нестеров В.Н. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин // Труды III международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 28-30 января 2004. - С.1691-1700. ISBN 5-201-14996-9.
2. Нестеров В.П. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин // Измерительная техника.-2004, №7. - С.12-16.
3. Нестеров В.Н., Жеребятьев К.В. Математическое моделирование шестизвенного манипулятора универсального промышленного робота. Прямая кинематическая задача для робота ПР125 // Вестник Самарского государственного технического университета. - 2005. Вып. №32. - С.19-28.
4. Нестеров В.П., Мещанов А.В. Теоретические основы измерений составляющих многокомпонентных перемещений визуальных объектов на базе метода многомерных тестов // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы и доклады V Международной научно-технической конференции 11-17 сентября 2006г.: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганов, Г.П. Ярового. – Самара, 2006. - С.340-341.
5. Нестеров В.Н., Мещанов А.В. Комбинационные математические модели и метод многомерных тестов в оптических измерениях составляющих многокомпонентных перемещений подвижных объектов // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2007). Т.2. – СПб.: СПбГЭУ (ЛЭТИ). 2007.- С.21-30.
6. Нестеров В.Н., Мухин В.М., Мещанов А.В. Принципы построения оптических систем контроля параметров движения подвижных целей на основе метода многомерных тестовых объектов // Боеприпасы и спецхимия. – 2007. - № 4. С.90-94.
7. Нестеров В.Н. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления "ДАТЧИК-2001": Сб. матер. XIII Н.-т. конф. с участием зарубеж. спец. Под ред. проф. В.Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2001. - С.175-177.
8. К.Фу. Р.Гонсалес, К.Ли. Робототехника: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 624 с.
9. Неганов В.А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. - 432с.
10. Shih S.W., Hung Y.P., Lin W.S. Calibration of an active binocular head // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics – part A: systems and humans. - July 1998. Vol. 28, No.4. - P.426-442.

11. Li Mei Song, Ming Ping Wang, Lu Lu Huang ling Huan. High precision camera calibration in vision measurement // Optics & Laser Technology. - 2007. Vol. 39. - P.1413-1420.

12. В.Н.Нестеров, А.В.Мешанов. Теоретические основы оптических измерений составляющих многокомпонентных перемещений подвижных объектов на базе метода многомерных тестов // Измерительная техника. – 2007. - №11. - С.3-9.

13. Пат. 2315948 РФ, МПК G 01 B 11/00. Способ измерения компонентов сложивших перемещений объекта / В.Н. Нестеров, А.В. Мешанов, В.М. Мухомин. №2006114270/28; Заявл. 26.04.2006; Опубл. 27.01.2008. Бюл. №3.

РЕГИСТРАЦИЯ ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.В. Брагин

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В настоящее время в связи с увеличением времени функционирования КА в околоземном космическом пространстве необходимо создание научных методов прогнозирования поведения материалов и их защита в условиях факторов космической среды. С учетом многообразия физических процессов, вызывающих электризацию материалов спутника, представляется целесообразным проведение их анализа с целью установления по определенным критериям степени электризации, условий ее поражающего воздействия на бортовую РЭА и создания системы единого методологического подхода при решении проблемы учета влияния электризации при проектировании и эксплуатации спутника. Основными методами определения заряда на поверхности космического аппарата являются электрооптический метод динамического конденсатора, вращающихся лопастей, на основе чаши Фарадея.

Перспективными являются электрооптические методы, основанные на преобразовании измеряемых электрических величин в параметры оптического излучения и применении оптических каналов связи для передачи измерительной информации из зоны высокого напряжения на низковольтную часть измерительного устройства. Преимуществами этих методов являются высокое быстродействие, защищенность от электромагнитных помех, а также надежная естественная электрическая изоляция между высоковольтной и вторичной измерительными цепями вследствие их полной электрической развязки. Электрооптические методы разделяются на методы с внутренней модуляцией, при которых сигнал измерительной информации непосредственно воздействует на источник оптического излучения, изменяя параметры его излучения, и методы с внешней модуляцией, основанные на воздействии измеряемой величины