21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers ‘Science – Future of Lithuania’
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АВИАДЕТАЛЕЙ

Владимир Квасников, Александр Осмоловский, Анжелика Стахова

Национальный авиационный университет,
Кафедра компьютеризированнных електротехнических систем, Киев, Украина,
E-mail: *kvp@nau.edu.ua; osmo5@ukr.net; angelik2003@ukr.net*

Аннотация. Представлены результаты исследований по повышению качества измерений трехкоординатных информационно-измерительных систем механических величин путем совершенствования автоматического управления, за счет организации пространственного движения измерительной головки, которое представлено в виде уравнений кривых поверхностей заданных параметрически.

Ключевые слова: измерение, трехкоординатные информационно-измерительные системы, измерительный наконечник, управление, геометрическая поверхность.

Введение

Стремительное развитие авиационной промышленности отличается широким использованием деталей сложной пространственной поверхности в конструкциях и технологических процессах. Несмотря на большое количество работ в области исследования качества поверхностного слоя, недостаточно изучена проблема перераспределения остаточных напряжений в поверхностном слое, которое может приводить к нарушению геометрической точности деталей. Одновременно с этим постоянно повышаются требования к надежности и экономической эффективности изготовления деталей сложной пространственной поверхности. Это в свою очередь требует повышение точности измерительных операций, оптимальный выбор средств для трехкоординатных измерений параметров деталей и совершенствование существующих трехкоординатных информационно-измерительных систем (ТИИС), путем автоматического управления.

Проанализированы литературные источники, которые рассматривают наиболее распространенную задачу теории автоматического управления, которая состоит в переводе состояния динамической системы из начальной точки x_0 в заданную конечную точку x_i (Fradkov *et al.* 1999; Furasov 1978; Isidori 1995; Kolesnikov 1994; Korolev, Miroshnik 2000; Miroshnik 2000). При общем подходе, когда исходное состояние удалено от конечной точки на значительное расстояние классическая теория предполагает глобальную стабилизацию системы (Miroshnik 2000). Кроме того, при условии фиксации начального состояния, решение задачи по обходу траектории детали, которая проходит через заданные точки x_0, x_i обеспечивает желаемое качество измерительной системы. Методы, которые принято использовать при решении задач управления координатно-измерительными машинами, станками с числовым программным управлением связанны с использованием геометрических особенностей динамических систем и анизотропных свойств пространственного состояния синтезированной системы (Furasov 1978; Isidori 1995; Kolesnikov 1994). Таким образом, решение основной задачи управления системами для трехкоординатных измерений может быть сведено к организации пространственного обхода измерительной головкой, который может быть задан в виде уравнений кривых поверхностей второго и третьего порядков, а также других геометрических объектов.

Постановка задачи

При исследовании закономерностей для обеспечения движения по поверхности объекта измерения со сложной пространственной поверхностью, рассматривают многоканальную систему управления, которая может быть описано уравнениями (Fradkov *et al.* 1999; Kolesnikov 1994; Miroshnik 2000):

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u\ ;$$
$$y = h(x)\ , \qquad (1)$$

где: $x \in X \subset R^n$, n – мерный вектор состояния; $y \in Y \subset R^m$, m– мерный вектор выходных переменных, $u \in R^{m'}$, m' – мерный вектор управления (входных переменных); $G = \{g\}$; f, g_i, h – гладкие вектор-функции.

При общем подходе геометрические объекты измерения, которые имеют сложную пространственную поверхность (целевая множество) являются гладкими ν-мерными подмноговидами пространства состояния R^n (Fradkov *et al.* 1999; Miroshnik 2000):

$$S = \{x \in X : \varphi(x) = 0\}, \tag{2}$$

с вектором локальных координат $s \in S^* \subset R^{\nu}$, которые определяются уравнением вида:

$$s = \Psi(x), \tag{3}$$

где: φ, Ψ – гладкие векторы-функции размерности $n-\nu$ и ν, соответственно. Таким образом, уравнение (2) описывает основную задачу управления пространственным движением со сложной траекторией, то есть задачу, которая сводится к стабилизации системы относительно *S*, другими словами к поддержке системы на заданном множестве S при $x_0 \in S$ и притяжении к нему для начального состояния x_0, которые в свою очередь, принадлежат некоторой области множества вида *S*.

Графики движения измерительного наконечника по поверхности со сложной траекторией в трехмерном пространстве представлено на рис. 1. В процессе измерения перемещается не только измерительный наконечник, но и координаты X, Y, Z.

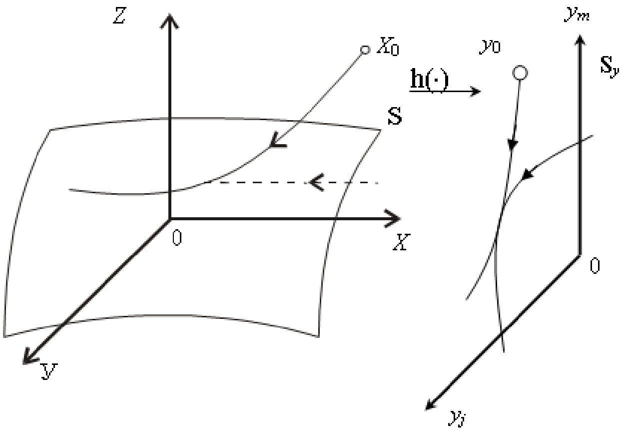

Рис. 1. Движение измерительного наконечника в пространстве

При проведении трехкоординатных измерений, кроме стандартных требований к системе, необходимо также обеспечить взаимодействие ее подсистем, которое устанавливается условиями согласованности:

$$\varphi_y(y) = 0, \tag{4}$$

где φ_y – гладкая вектор-функция имеющая размерность $m-\mu$, которая обусловливает необходимость согласования управляющих воздействий u_i.

Используя уравнение (4), в пространстве R^m становится возможным определить сложную пространственную поверхность – μ-мерного целевого множества S_y. В свою очередь, обобщенный μ-мерный вектор выходных переменных y_i определяется выражением вида (Uonem 1980):

$$\bar{y} = \Psi_y(y), \tag{5}$$

где: Ψ_y – гладкая вектор-функция размерности μ.

Решение задачи управления ТИИС

Решение задачи управления ТИИС по обходу траектории должно предусматривать, что система должна лежать на подмноговидах (т.е. множество точек измерения, которое лежит в рабочем пространстве) $S_y = \{y \in Y : \varphi_y(y) = 0\}$ (Miroshnik 2000; Uonem 1980). При этом, вектор-функция $\bar{y}$ измерительного наконечника представляется локальными координатами, которые соответствуют пути прохождения кривой или длиной координатной линии сложной пространственной поверхности.

При проведении измерений под геометрической поверхностью в многообразии S_y понимаем множество точек заданных параметрическими уравнениями, которое описывает измерительный наконечник:

$$x^i = x^i\left(u^1, ..., u^m\right) \quad \left(i = 1, 2, ..., n\right), \tag{6}$$

Где: $u^1, ..., u^m$– независимые переменные, проходящие некоторую m-мерную область изменения Ω_n. При этом считаем, что функции $x^i\left(u^1, ..., u^m\right)$ непрерывно дифференцированными N раз (N – класс многообразия) и удовлетворяют условию регулярности поверхности:

$$\text{ранг матрицы } \left\| \begin{matrix} \dfrac{\partial x^1}{\partial u^1} & \dfrac{\partial x^2}{\partial u^1} & \cdots & \dfrac{\partial x^n}{\partial u^1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dfrac{\partial x^1}{\partial u^m} & \dfrac{\partial x^2}{\partial u^m} & \cdots & \dfrac{\partial x^n}{\partial u^m} \end{matrix} \right\| \text{ равна } m,$$

другими словами строки представленной матрицы линейно независимы, а число проводимых измерений поверхности может принимать значения $1, 2, ..., n-1$. При $m = 1$ будем имеем множество точек заданных параметрическими уравнениями

$$x^i = x^i(t). \tag{7}$$

Причем, одновременно считаем, что $\frac{dx^i}{dt}$ не преобразуется в ноль. Рассмотрим, что при заданном значении t начальное состояние находится в точке M, а при $t+dt$ состояние переходит в бесконечно близкую точку M'. Тогда, дифференциалы координат $dx^i = dx^i(t)$ образуют в точке M контрвариантный тензор один раз. При переходе в многообразии к новым координатам имеем:

$$x^{i'} = x^{i'}\left(x^1,..., x^n\right), \tag{8}$$

по формуле полного дифференциала для бесконечно малого перемещения по кривой получим выражение

$$dx^{i'}(t) = \frac{\partial x^{i'}}{\partial x^i}(M)dx^i(t), \tag{9}$$

которое подразумевает тензорный закон преобразования для dx^i.

Допустим, что с некоторой точки берутся бесконечно малые перемещения по всем возможным направлениям в многообразии, в тоже время полученные смещения находят себе отражение в виде определенных бесконечно малых перемещений (векторов dx) с той же точки M в касательном аффинном пространстве. Таким образом, касательное пространство не только соприкасается многообразием в точке M, но и "сливается" с ним в бесконечно малой окрестности точки M с точностью первого порядка. Перемещаясь из данной точки M по поверхности в бесконечно близкую точку M' по любой кривой, мы можем пренебречь бесконечно малыми высокого порядка, то есть выразить это перемещение бесконечно малым вектором в касательной плоскости.

Таким образом, производные $\frac{dx^i}{dt}$ образуют тензор в уравнении (7). Следовательно, тензору $\xi^i = \frac{dx^i}{dt}$ в касательном пространстве должен соответствовать определенный вектор ξ, который будем называть касательным вектором к кривой в точке M.

Согласно изложенного, значение условия (7) заключается в том, чтобы предотвратить появление особых точек на поверхности и как результат, переход к меньшему числу измерений. В то же время, если функции находящиеся в правой части выражения (6) являются константами, то условие дифференцирования выполняется, но при этом поверхность переходит в точку. Наличие условия (6) позволяет говорить, что в данной точке ранговый минор образованный первыми m столбцами

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial u^1} & \cdots & \frac{\partial x^m}{\partial u^1} \\ . & . & . \\ \frac{\partial x^1}{\partial u^m} & \cdots & \frac{\partial x^m}{\partial u^m} \end{vmatrix} \neq 0 .$$

Следовательно, функциональная зависимость первых m текущих координат x^1 от $u^1,..., u^m$ приобретает вид

$$x^1 = x^1\left(u^1,..., u^m\right),..., \quad x^m = x^m\left(u^1,..., u^m\right),$$

при этом, имеет якобиан отличный от нуля и позволяет ее преобразовать в окрестности данной точки

$$u^1 = u^1\left(x^1,..., x^m\right),..., u^m = u^m\left(x^1,..., x^m\right).$$

Описание управления ТИИС

Для описания управления ТИИС, которое представим в виде моделей продольных и относительных движений:

$$\dot{s} = f_s(s,e) + G_S(s,e)u, \tag{10}$$

$$\dot{e} = f_e(s,e)e + G_S(s,e)u, \tag{11}$$

где: $e = \varphi(x)$ – вектор относительного движения.

Специальный выбор матрицы $\left[L_s/L_e\right]$ преобразования управляющих воздействий

$$u = L_s(x)u_s + L_e(x)u_e, \tag{12}$$

где: u_s – вектор продольных управлений, а u_e – вектор относительных управлений.

Найдем общее решение задачи, решением уравнений (6), (7) в виде

$$U_e = U_e(s) + K(s)e,$$

где: $K(s)$ – матрица нестационарных обратных связей по относительному движению.

Таким образом, имеем преобразование координат, которое представлено выражением (10) и вектором относительного движения

$$\varepsilon = \varphi_y(y). \tag{13}$$

В свою очередь, матрица Якоби $\Phi_y(y) = \begin{bmatrix} \partial\psi_y/\partial y \\ \partial\varphi_y/\partial y \end{bmatrix}$ при $y \in S_y$ для гладкого многообразия обратима, то есть выполняется условие регулярности: $\det \Phi_y(y) \neq 0$.

Для получения динамики продольного движения $\bar{y}(t)$, может быть использован эталонным сигнал $\bar{y} = \bar{y}(t)$, который генерируется эталонной моделью вида

$$\dot{s}_1^* = \dot{s}_2^*,..., \dot{s}_r^* = A_{11}^* s^* + u_s^*(t), \quad \bar{y} = \dot{s}_1^*. \tag{14}$$

Тогда стабилизация системы относительно множества S достигается посредством управления, используя уравнение вида

$$u_e = -A_{21}(s,e)s - K(s)e.$$

Выводы

На основе анализа существующего состояния методов измерений ТИИС механических величин, показано, что использование геометрического метода, дает возможность упростить ряд задач, сводя их к набору более простых подзадач. При этом необходимо учитывать анизотропность пространственного состояния или состояния исходного пространства синтезированной системы. Что в свою очередь позволит рассматривать решение общей задачи в виде проблем инвариантности, стабилизации подмножества и поддержания заданного режима продольных движений ТИИС.

На основе проведенного анализа, а также известных практических исследований определены основные перспективные направления, в частности: разработка новых методов, способов и алгоритмов измерения геометрических параметров с высокой точностью, разработка методики и алгоритмов оценки метрологических характеристик в условиях действия дестабилизующих факторов.

Литература

Fradkov, A.; Miroshnik, I.; Nikiforov, V. 1999. *Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems Dordrechu Kluwer Acad.* Publ. 187 p.

Furasov, V. 1978. *Устойчивость движения, оценки и стабилизация.* М.: Наука. 274 с.

Isidori, A. 1995. *Nonlinear Control Systems.* N.Y.: Springer-Verlag. 192 p.

Kolesnikov, A. 1994. *Синергетическая теория управления.* Таганрог: Гос. Радиотехн. Ун-т; М.: Энергоатомиздат. 284 с.

Korolev, S.; Miroshnik, I. 2000. Анализ динамики и управление пространственным движением нелинейных динамических систем, *Автоматика и телемеханика* 1: 1-16.

Miroshnik, I. 2000. Геометрические методы синтеза и управления пространственным движением нелинейных динамических систем, *Известия ВУЗов. Приборостроение* 43 (1-2): 23-30.

Uonem, M. 1980. *Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход.* М: Наука. 249 с.