

Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объёмных геометрических погрешностей

*В.И. Телешевский,
проф., каф. ИИСuТ, д.т.н.,
В. А. Соколов,
асп., vasokolv-stankin@yandex.ru,
Я.И. Пимушкин,
асп.,
МГТУ «СТАНКИН», г. Москва*

Рассмотрен метод коррекции геометрических погрешностей многокоординатного оборудования (станков, КИМ и приборов) с программным управлением. Для наблюдения за многокоординатной системой используется многофункциональная лазерная информационно-измерительная система (ЛИИС). На основе измерения определённого числа пространственных функций выстраивается карта систематических погрешностей во всём рабочем пространстве машины (более 10000 точек за 40 секунд). Развивается метод картографирования погрешности (error mapping). Предложен новый метод формирования стратегии коррекции по распределению погрешностей в рабочем пространстве машины и разрабатывается постпроцессор управляющих программ, обеспечивающий минимальные объёмные погрешности во всём рабочем пространстве. Приводятся экспериментальные результаты на примере коррекции трёхкоординатных станков с ЧПУ высоких классов точности.

The paper describes a volumetric geometric errors correction method for CNC-controlled multi-axis systems (machine-tools, CMMs etc.). The Kalman's concept of "Control and Observation" is used. A versatile multi-function laser interferometer is used as Observer in order to measure machine's error functions. A systematic error map of machine's workspace is produced based on error functions measurements. The error map results into error correction strategy. The paper proposes a new method of error correction strategy forming. The method is based on error distribution within machine's workspace and a CNC-program postprocessor. The postprocessor provides minimal error values within maximal workspace zone. The results are confirmed by error correction of precision CNC machine-tools.

Введение

Многокоординатные системы с программно управляемым перемещением узлов и механизмов лежат в основе современного машиностроения. К ним относится как технологическое оборудование, так и измерительные системы (координатно-измерительные машины и приборы) [1-3]. В настоящее время возрастают требования не только к точности позиционирования отдельных рабочих органов технологического и измерительного оборудования, но и к объёмной точности (ОТ) машины в целом – способности точно воспроизводить измерительным наконечником или режущей кромкой инструмента сложные трёхмерные поверхности.

1. Постановка задачи

Количественно ОТ характеризуется объёмной погрешностью (ОП): вектором между номинальным (заданным программно) и действительным положением рабочей точки (измерительного наконечника либо режущей кромки инструмента) в произвольной точке рабочего пространства машины. Впервые понятие ОТ введено в работе [5], и в последнее время проблематика повышения ОТ получила широкое распространение [6-9]. В метрологии совершенствуется другой метод повышения ОТ, основанный на измерении геометрических погрешностей станка или КИМ с последующей их автоматической компенсацией [6-7].

Развитию указанного направления повышения ОТ способствуют две современные тенденции: совершенствование систем программного управления и существенный прогресс в области измерения параметров погрешности [2]. В настоящее время на смену традиционным методам приходят многофункциональные лазерные информационно-измерительные системы (ЛИИС), которые позволяют измерять не только перемещения, но и отклонения от прямолинейности вдоль осей, отклонения от перпендикулярности, угловые отклонения и другие функции геометрических погрешностей [2,10,11,12]. Более того, в последнее время появляются ЛИИС, способные за одно движение рабочего органа провести измерение до 6 функций погрешности, что безусловно, повышает производительность процессов наблюдения [13].

Эти тенденции, одна из которых лежит в области совершенствования процессов управления системами, а другая – в области повышения эффективности средств измерения и контроля геометрических параметров, открывают принципиально новые возможности для повышения ОТ многокоординатных систем посредством электронной компенсации погрешностей. Суть этих возможностей базируется на калмановской концепции дуальности процессов управления и наблюдения, разрабатываемых в системной динамике сложных управляемых систем [14].

В ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» данная концепция развивается впервые применительно к программно управляемым многокоординатным технологическими и измерительным системам [15-17].

В рамках данной концепции рассматривается единство процессов наблюдения и управления. При этом наблюдение рассматривается не в общепринятом в метрологии значении «снятия отсчёта», а в смысле процесса системной динамики.

Как было указано в [4,15,16] информационный поток в технологическом процессе имеет две стороны: одну, связанную с организацией воздействия на технологическую систему – процесс управления (control) и вторую – наблюдение

дение (observation), целью которого является измерение разнообразных пространственных функций погрешности, перечень которых приведён в [9]. В работах [6,9,10] было показано, что для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей системы в её рабочем пространстве (error mapping) необходимо измерение большого числа пространственных функций. Так, например, для трёхкоординатной системы это число достигает 21, для пятикоординатной системы – более 30 [6], для систем с большим числом координат это число ещё более возрастает. Однако при наличии высокопроизводительной многофункциональной ЛИИС увеличивающийся объём наблюдения вполне реален для восстановления модели состояния за вполне разумное время.

2. Теория

Любой современный станок или КИМ представляет собой последовательность систем программного перемещения ведомого узла относительно исходного узла вдоль координатных осей (поступательные перемещения), или относительно координатных осей (вращательные перемещения). За счет погрешностей координатных перемещений, а также погрешностей, связанных с установкой машины на фундамент, происходит искривление трёхмерного пространства машины и возникают погрешности обработки или измерения изделий. Для определения искажений изделия или его образа требуется построение картины пространственной точности машины путем предварительной калибровки и определения точности взаимного расположения координатных осей.

Для составления модели состояния технологической или измерительной системы используется множество методов и подходов – метод Денавита-Хартенберга [18], метод описания кинематики твёрдого тела (rigid body kinematics) [19], кинематики множества твёрдых тел (Multiple-body kinematics) [20], методы матричной симуляции [21]; в отдельных статьях рассматриваются не только систематические, но и случайные характеристики точности оборудования [22].

Полная геометрическая погрешность в рабочем пространстве определяется как решение матричного выражения:

$$XYZ = R_X [R_Y (R_Z^{-1} T + Z - Y) - X] \quad (1)$$

где X, Y, Z – векторы, содержащие информацию о линейных отклонениях и отклонениях от перпендикулярности; R_X, R_Y, R_Z – матрицы поворота, содержащие информацию об угловых отклонениях; T – вектор коррекции на размеры инструмента.

Из выражения (1) вводятся выражения для полных погрешностей по каждой из координатных осей: отклонения по оси X:

$$\Delta X = \delta_{xx}(X) + \delta_{xz}(Z) + \delta_{xy}(Y) + Y[\varepsilon_{zy}(Y) + \varepsilon_{zx}(X)] + Y\alpha_{yx} - Z[\varepsilon_{yy}(Y) + \varepsilon_{yx}(X)] - Z\alpha_{zx} + X_T - Y_T[\varepsilon_{zx}(X) + \varepsilon_{zy}(Y)] - Z_T[\varepsilon_{yz}(Z) + \varepsilon_{yy}(Y) + \varepsilon_{yx}(X)]; \quad (2)$$

отклонения по оси Y:

$$\Delta Y = \delta_{yy}(Y) + \delta_{yx}(X) + \delta_{yz}(Z) - X\varepsilon_{zx}(X) - Z[\varepsilon_{xy}(Y) + \varepsilon_{xx}(X)] - Z\alpha_{zy} + X_T[\varepsilon_{zy}(Y) + \varepsilon_{zx}(X)] + Y_T - Z_T[\varepsilon_{xy}(Y) + \varepsilon_{xx}(X) + \varepsilon_{xz}(Z)]; \quad (3)$$

отклонения по оси Z:

$$\Delta Z = \delta_{zz}(Z) + \delta_{zx}(X) + \delta_{zy}(Y) - X\varepsilon_{yx}(X) - Y[\varepsilon_{xy}(Y) + \varepsilon_{xx}(X)] + X_T[\varepsilon_{yx}(X) + \varepsilon_{yz}(Z) + \varepsilon_{yy}(Y)] + Y_T[\varepsilon_{xy}(Y) + \varepsilon_{xz}(Z) + \varepsilon_{xx}(X)] + Z_T, \quad (4)$$

где X, Y, Z – координаты текущей точки рабочего пространства;

X_T, Y_T, Z_T – координатные составляющие вектора T ;

Модуль вектора геометрической погрешности в конкретной точке рабочего пространства определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (5)$$

3. Результаты экспериментов

В качестве объекта наблюдения и управления был выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр с тремя управляемыми координатами - станок модели VF3 фирмы «HAAS» (США).

Компоновка данного станка соответствует рассмотренной в [9] и распространённой как среди измерительных машин, так и среди станков компоновке с горизонтальным столом, реализующим перемещение по осям X и Y, и вертикальной осью Z.

Основные характеристики станка представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики станка HAAS VF3

Параметры перемещений рабочих органов	
Величина рабочих перемещений по осям, мм	
по оси X	1016
по оси Y	508
по оси Z	635
Параметры точности	
Точность позиционирования суппорта, мм	±0,0050
Повторяемость позиционирования суппорта, мм	±0,0025

Для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей машин с такой компоновкой авторами использован метод описания кинематики твёрдого тела (rigid body kinematics), используемый авторами в [9]. В качестве средства измерения была выбрана многофункциональная сертифицированная ЛИИС Renishaw XL80.

В соответствии с сформулированными в [9] требованиями были выбраны следующие позиции рабочих органов вдоль координатных осей для определения точностных характеристик станка:

- Ось X: 50 мм. – 950 мм. с шагом 100 мм – 10 точек.
- Ось Y: 25 мм. – 475 мм. с шагом 50 мм – 10 точек.
- Ось Z: 25 мм. – 520 мм. с шагом 55 мм – 10 точек.

Для проведения измерений были написаны программы для системы ЧПУ станка, обеспечивающие перемещение рабочих органов станка в указанные выше положения.

Результат построения модели состояния станка – карты погрешностей – представлен на рис. 1.

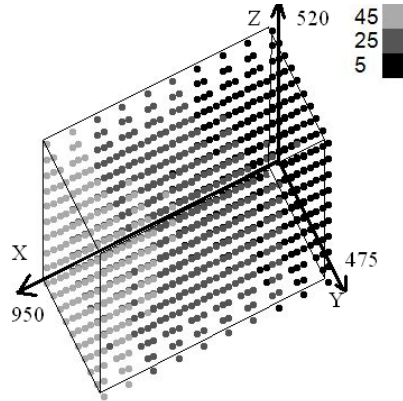


рис.1. Распределение ОП в рабочем пространстве машины. Цветовая шкала в мкм.

Как показали измерения, в рабочем пространстве станка точки, в которых объёмная геометрическая погрешность составляет не более 5 мкм, занимают 20% рабочего пространства.

В современном машиностроении управление технологическим процессом осуществляется посредством взаимодействия CAD/CAM систем и системы ЧПУ станка. Для управления точностью авторами был выбран метод коррекции погрешностей, который сводится к изменению координат, в которые система приводов машины выводит измерительный наконечник или режущую кромку инструмента. Суть данного метода проиллюстрирована на рис. 2 и описана ниже.

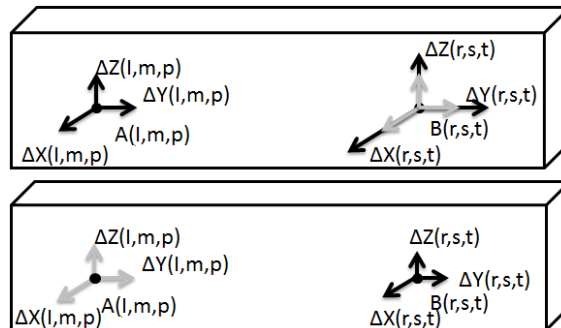


рис. 2. Иллюстрация метода коррекции погрешностей. Чёрным цветом показаны векторы, соответствующие погрешностям в соответствующих точках, серым цветом – векторы погрешности в точке А, которые вычитаются из соответствующих векторов погрешностей всех точек

Выберем произвольные точки рабочего пространства: точку А с номерами (l,m,p) и точку В с номерами (r,s,t). Вектор погрешности в точке А определяется значениями $\Delta x_{(l,j,k)}, \Delta y_{(l,j,k)}, \Delta z_{(l,j,k)}$. Вектор погрешности в точке В определяется значениями $\Delta x_{(r,s,t)}, \Delta y_{(r,s,t)}, \Delta z_{(r,s,t)}$. Выражения для $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ приведены в формулах (2-4) в [9]. Если вычесть из значений погрешностей во всех точках значения погрешности в точке А (например, сместив начало координат системы координат станка), то значения погрешностей в точке А обнулятся, то есть $\Delta x_{(l,j,k)} = 0, \Delta y_{(l,j,k)} = 0, \Delta z_{(l,j,k)} = 0$ а значения погрешностей в точке В примут другие значения:

$$\Delta x^{ck}_{(r,s,t)} = \Delta x_{(r,s,t)} - \Delta x_{(l,j,k)} \tag{6}$$

$$\Delta y^{ck}_{(r,s,t)} = \Delta y_{(r,s,t)} - \Delta y_{(l,j,k)} \tag{7}$$

$$\Delta z^{ck}_{(r,s,t)} = \Delta z_{(r,s,t)} - \Delta z_{(l,j,k)} \tag{8}$$

Таким образом, модуль погрешности в точке A

$$\Delta A = 0 \tag{9}$$

Модуль погрешности в точке B

$$\Delta B = \sqrt{(\Delta x_{(r,s,t)}^{ck})^2 + (\Delta y_{(r,s,t)}^{ck})^2 + (\Delta z_{(r,s,t)}^{ck})^2} \tag{10}$$

Перебирая все выбранные точки рабочего пространства и принимая их за нулевые, найдём такую точку, для которой сумма модулей скорректированных погрешностей минимальна.

$$\sum_i \Delta F_i \rightarrow \min \tag{11}$$

Где $i=1, \dots, N$;

N – число измеренных точек в рабочем пространстве;

F – произвольная точка в пространстве.

Для осуществления коррекции был разработан программный комплекс – постпроцессор управляющих программ. Место разработанного постпроцессора управляющих программ представлено на рис. 3.

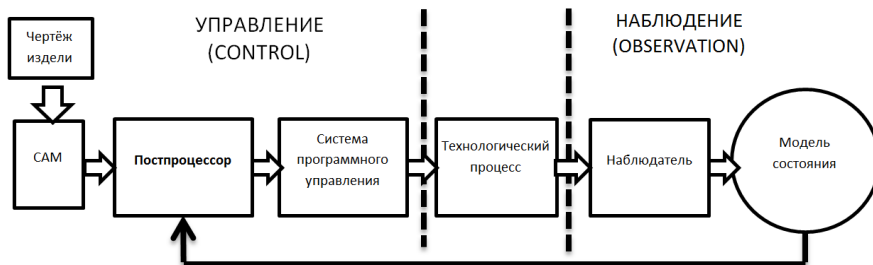


рис.3 Схема взаимодействия информационных потоков в технологической системе

Результат работы такого постпроцессора представлен на рис. 4. Как показали результаты измерения, погрешности во всех точках станка отличаются от расчётных не более, чем на 3%. При этом малые погрешности (менее 5 мкм) заняли максимальную долю рабочего пространства машины – более 80% пространства, по сравнению с 20% пространства до коррекции.

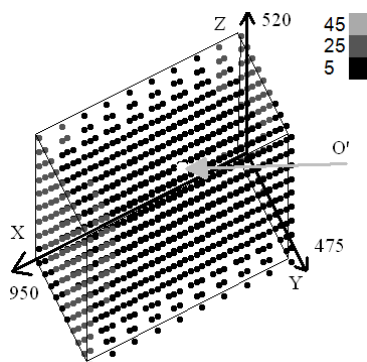


рис. 4. Распределение ОП в рабочем пространстве машины после проведения коррекции.

Цветовая шкала в мкм. Белая точка O' является оптимальным началом координат пространства, относительно которого сумма модулей погрешностей во всех точках минимальна

Построенный постпроцессор управляющих программ реализует следующую последовательность действий:

1. В постпроцессор загружаются результаты измерений погрешности;
2. По формулам из [10] рассчитываются составляющие полной погрешности для точек рабочего пространства;
3. Начало координат в системе координат станка смещается по всем координатным осям на величину погрешностей, рассчитанную для некоторой k-й точки рабочего пространства. Такое смещение позволяет скомпенсировать ОП в заданной точке во время выполнения подготовленной программы системой ЧПУ;
4. В остальных точках координатные составляющие ОП изменяются на величину сдвига начала координат, что приводит к изменению распределения погрешности в рабочем пространстве машины.
5. Шаги 3-4 повторяются для каждой i-й точки рабочего пространства. Результатом такого перебора является нахождение такой j-й точки, при внесении коррекции по которой суммарное значение модулей ОП для всех точек рабочего пространства минимально, согласно (6).
6. Условие (6) позволяет получить минимальную погрешность в максимальной зоне рабочего пространства.
7. В постпроцессор загружается управляющая программа, сформированная системой САМ;
8. Постпроцессор анализирует кадры программы на языке G-code, и изменяет значения координат в кадрах в соответствии с величиной, найденной на этапе 5 точке j;
9. Управляющая программа с изменёнными кадрами загружается в систему ЧПУ.
10. Более конкретно реализация постпроцессора будет представлена в дальнейших публикациях авторов.

Выводы

Предложенный метод коррекции по существу сводится к оптимальному поиску «нулевой точки» рабочего пространства, учитывающей геометрические ОП данной конкретной машины и обладающей тем свойством, что ОП машины минимальны в наибольшем объеме рабочего пространства.

Эффективность предложенного метода коррекции подтверждена реальными измерениями в физическом рабочем пространстве многокоординатной машины.

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания на выполнение научных исследований (НИР №1883). Работы проведены на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Литература

1. Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Телешевский В.И., Емельянов П.Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства. // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56-59; Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskii V.I., Emelyanov P.N. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry//Measurement Techniques. 2013. V. 55. N 11. P. 1311-1315 Кононогов С. А.,
2. Лысенко В.Г., Золотаревский С.Ю. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы. // Приборы. – 2008. - № 3. С. 1-13.
3. Телешевский В.И., Гришин С.Г. Измерительная информационная система для нанометрологии // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2008. № 2. С. 33-40.
4. Телешевский В.И. К проблеме интеллектуализации измерительных процессов в производственных системах. В сборнике: Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'99) Сборник докладов. 1999. С. 34-37.
5. С.Н. Григорьев, В.И. Телешевский. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования. // Измерительная техника. 2011. N 7. С. 13-18; Grigoriev S.N., Teleshevskii V.I. Measurement problems in technological shaping processes//Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. P. 744-749.
6. McKeown P. A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines//Ann. CIRP. 1973. N 22(1).
7. Schwenke H. e. a. Geometric error management and compensation of machines – an update // Ann. CIRP. 2008. N 57. P. 660–675.
8. Grigoriev S.N., Teleshevsky V.I., Sokolov V.A. Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction. International Conference on Competitive Manufacturing «COMA`13» 30 January - 1 February 2013 Stellenbosch, South Africa. Organized by the Department of Industrial Engineering Stellenbosch University. P. 301-306.
9. Grigoriev S.N., Teleshevsky V.I., Sokolov V.A. Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction. International Conference on Competitive Manufacturing «COMA`13» 30 January - 1 February 2013 Stellenbosch, South Africa. Organized by the Department of Industrial Engineering Stellenbosch University. P. 301-306.
10. Телешевский В.И., Соколов В.А. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением. // Измерительная техника. - 2012. - № 5. - С. 33-37; Teleshevskii V.I., Sokolov V.A. Laser correction of geometric errors of multi-axis programmed-controlled systems//Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 535-541.
11. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. - М.: Лепанд, 2015. – 304 с.
12. Фирма Renishaw. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [офиц. сайт]. <http://renishaw.com> (дата обращения: 21.02.2015).
13. Фирма Hewlett Packard. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [офиц. сайт]. <http://hp.com> (дата обращения: 21.02.2015).
14. Фирма Automated Precision Inc. (API) Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [офиц. сайт]. <http://apisensor.com> (дата обращения: 21.02.2015).
15. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. — М.: Наука, 1985. — 351 с. — (Теория и методы системного анализа).
16. Телешевский В.И. Принципы построения компьютеризированных систем обеспечения качества. // Автоматизация проектирования. – 1999. - № 1., - С. 21-27.
17. Телешевский В.И. Измерительная информатика в машиностроении// Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2008. – № 1., - С. 33-38.
18. Телешевский В.И. Измерительная информатика в машиностроении (окончание)// Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2008. – № 2., - С. 41-45.
19. A. Lamikiz, L. N. López de Lacalle, O. Ocerin, D. Díez, E. Maidagan. The Denavit and Hartenberg approach applied to evaluate the consequences in the tool tip position of geometrical errors in five-axis milling centres. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. - № 37. С. 122–139
20. Rahman, M., Heikkala, J., Lappalainen, K. Modeling measurement and error compensation of multi-axis machine tools. //International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2000. - №40. – P. 1535-1546
21. Okafor, A.C., Ertekin, Y.M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. – № 40(8). - P. 1199–1213
22. Lin, Y., Shen, Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2003. – 21. - 243–248
23. Ahn, K. Gee., Cho, D. W. An analysis of the volumetric error uncertainty of a three axis machine tool by beta distribution. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. – 40. - 2235–2248.