

КРЕСТООБРАЗНАЯ СТРУКТУРА СЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ МАНИПУЛЯТОРА РОБОТА**В.Н. Гришанов**Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, 34

г. Самара, Россия,

443086

vladgrishanov@yandex.ru

Для автономного измерения расстояния манипулятора робота или робота в целом и его ориентации относительно некоторой базовой поверхности предлагается использовать оптико-электронную систему, состоящую из телекамеры и лазерного модуля на базе полупроводникового лазера с оптикой, формирующей крестообразную структуру поперечного сечения пучка излучения. При этом точку пересечения линий, формируемых на поверхности изделия структурированным в крест лазерным пучком, можно использовать для измерения расстояний, а угловые координаты линий – для измерения ориентации манипулятора относительно измерительной системы. Крестообразная структура лазерного пучка позволяет измерить два угла Эйлера, характеризующие угловое положение твёрдого тела в пространстве, – угол прецессии и угол нутации. Углы Эйлера измеряются по положению пересекающихся прямых – следов пересечения лазерных плоскостей с плоской поверхностью твёрдого тела. Были получены выражения, связывающие положения прямых в поле зрения телекамеры с углами прецессии и нутации. Структурированные лазерные пучки крестообразной формы и полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации оптико-электронных систем позиционирования и ориентации космических аппаратов и исследовании пространственных форм колебаний конструкций.

Ключевые слова: лазер, робот, манипулятор, бесконтактные дистанционные измерения, расстояние, ориентация, углы Эйлера.

1 Введение

Разработчиками оптоэлектронной техники представлен широкий спектр надёжных модулей на базе полупроводниковых лазеров, которые могут с успехом использоваться в качестве источников излучения в системах дистанционного бесконтактного измерения геометрических и кинематических параметров изделий.

Встроенная в лазерные модули с полупроводниковыми лазерами оптика способна формировать различные структуры распределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка: круг, точку с дополнительной дифракционной окружностью, линию, крестообразную, причём в двух последних случаях изготовитель гарантирует изгиб (отклонение от прямой) на дистанции в 10 м не более 1 мм и отклонение от перпендикулярности двух пересекающихся линий не более 1 угловой минуты. При необходимости, для прецизионных измерений стабильная

отсчётная база, независящая от температурных девиаций оси диаграммы направленности лазера, достигается использованием внешних по отношению к лазеру оптических элементов, формирующих структуру поперечного сечения пучка [1].

Для измерения кинематических и геометрических параметров чаще всего выбирают модули, генерирующие в видимом диапазоне, что удобно для настройки системы и визуального контроля её работоспособности, хотя предлагаются и ИК-модули со схожими структурами поперечного сечения пучка. Мощность излучения модулей варьируется от единиц до сотен милливатт. Мощность излучения модулей в совокупности с его когерентностью и спектральной фильтрацией в приёмном канале способны обеспечить высокие значения отношения сигнал/шум, которое и определяет погрешности измерения перемещений с субэлементным пространственным разрешением [2].

Существуют оптические элементы, способные формировать и более сложные фигуры в поперечном сечении пучка. Их называют дифракционными или фазовыми оптическими элементами, а иногда просто фокусаторами [3], но у них конфигурация плотности распределения быстро изменяется с расстоянием, тогда как простые формы распределения воспроизводятся в пределах дистанций, исчисляемых десятками метров.

Особенности крестообразной топологии поперечного сечения лазерного пучка открывают дополнительные метрологические возможности при использовании подобных модулей, например, появляются перспективы совмещения измерения дальности и ориентации. Дальность рассчитывается с помощью простых триангуляционных соотношений по координатам следа лазерного луча на поверхности объекта или его смещению.

2 Измерение дальности

Триангуляционный принцип измерения дальности с неструктурированным лазерным пучком описан во многих литературных источниках [4, 5]. Погрешности подобных измерений, обусловленные параметрами анализатора изображений и взаимной ориентацией излучателя и фотоприёмника подробно проанализированы в работе авторов [6].

Разница в использовании неструктурированного и крестообразного пучков состоит в процедуре обработки изображений. Для крестообразного пучка в качестве точки, по смещению которой оценивается перемещение участка поверхности, логично выбрать координаты точки пересечения линий, что и обуславливает разницу процедур обработки изображений. В случае простого кругового пучка чаще всего процедура обработки изображений сводится к отысканию координат центра изображения следа пучка на поверхности в том или ином смысле: энергетического центра, медианы распределения, центра гаусс-функции, в то время как для крестообразного пучка, из изображения нужно получить уравнения

линий, например, аппроксимируя их прямыми, и найти точку их пересечения. Понятно, что во втором случае процедура получается более сложной.

С другой стороны видно, что крестообразный пучок способен обеспечить диапазон измерения перемещений существенно больший по сравнению с круговым пучком, т.к. допускает измерение и при выходе точки пересечения линий из поля зрения фотоприёмного устройства (рисунок 1).

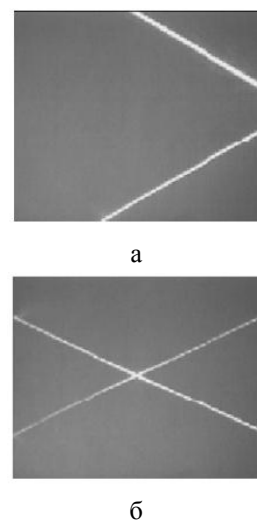


Рисунок 1. Точка пересечения линий-следов:
а - в поле зрения; б - за полем зрения матричного фотоприёмника

3 Измерение ориентации

Крестообразная структура лазерного пучка позволяет измерить кроме угла скручивания или собственного вращения и два других угла Эйлера, характеризующие угловое положение твёрдого тела в пространстве, – угол прецессии α и угол нутации β . Их определения даны на рисунке 2.

Углы Эйлера можно измерить по положению пересекающихся прямых – следов пересечения лазерных плоскостей с плоской поверхностью твёрдого тела. При этом угол между линиями-следами наиболее резко начинает меняться при угле прецессии $\alpha = 45^\circ$. Это демонстрируется на рисунке 3. На нём представлены цифровые фотографии линий-следов на плоском рассеивающем экране. Эксперимент ставился на просвет. Источником излучения служил лазерный

генератор креста, закреплённый на подвижном по углу β основании. Как видно, для угла нутации 0° следы-линии перпендикулярны друг другу, а при его увеличении до 58° отклонение линий-следов от перпендикулярности становится существенным.

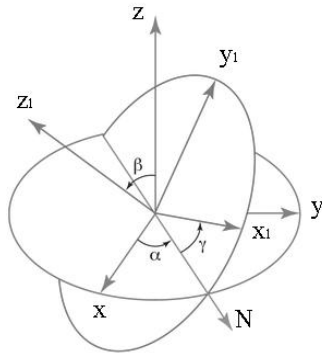


Рисунок 2. Определение углов Эйлера: (x, y, z) - начальная система координат; (x_1, y_1, z_1) - конечная система координат; N - линия узлов; α - угол прецессии; β - угол нутации; γ - собственный угол

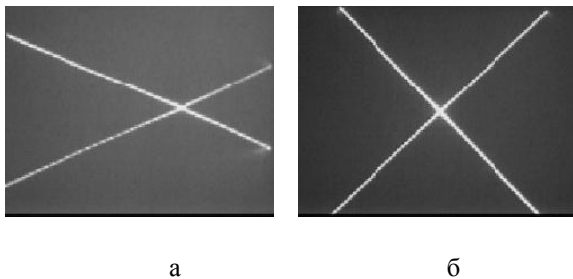


Рисунок 3. Изменение ориентации лазерных линий-следов при $\alpha = 45^\circ$: а) $\beta = 0^\circ$; б) $\beta = 58^\circ$

Были получены выражения, связывающие положения прямых в поле зрения телекамеры с углами прецессии и нутации. Системы координат выбраны таким образом (рисунок 4), чтобы при нулевом угле нутации оси координат обеих систем как связанной с лазерными плоскостями, которую следует считать начальной, так и самим объектом (конечной) совпадали.

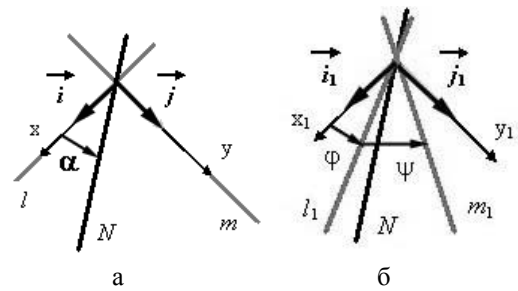


Рисунок 4. Крестообразная структура сечения лазерного пучка для измерения расстояния и ориентации манипулятора робота. Положение лазерных линий-следов в координатных системах при $\beta = 0$ - а) и при $\beta \neq 0$ - б): l, m, l_1, m_1 - линии-следы; N - линия узлов - ось, относительно которой поворачивается объект; (x, y) - система координат, связанная с лазерными плоскостями; (x_1, y_1) - система координат, связанная с объектом; α - угол прецессии; ϕ - угол поворота линии l в положение l_1 в системе координат, связанной с объектом; ψ - угол между лазерными линиями-следами; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{i}_1, \vec{j}_1$ - направляющие векторы осей координат

Рисунок 4 интерпретируется следующим образом. Система координат (x, y, z) материализуется лазерными взаимно перпендикулярными плоскостями, а система (x_1, y_1, z_1) - матричным фотоприёмником, жестко связанным с объектом, причём оптическая ось фотоприёмного устройства перпендикулярна поверхности объекта. Предполагается, что координатные оси z и z_1 , а также их направляющие векторы $\vec{k}$ и $\vec{k}_1$ направлены перпендикулярно плоскости рисунка и совпадают соответственно с оптическими осями лазерного пучка и фотоприёмного устройства. В начальный момент времени до поворота объекта обе системы координат совмещены, а линии-следы l и m совпадают с осями координат. В результате поворота объекта относительно оси узлов N на угол β произойдет поворот линий-следов (рисунок 4). В поле зрения матричного фотоприёмника, т.е. в системе координат (x_1, y_1, z_1) , которая уже не будет совпадать с системой (x, y, z) , линия l займет положение l_1 , а линия m - положение m_1 . Положение линии l_1 характеризуется углом ϕ , а взаимная ориентация линий l_1 и m_1 - углом ψ , причём эти углы измеримы экспериментально по изображениям, примеры которых даёт рисунок 3.

Измерительная задача состоит в том, чтобы по экспериментально измеренным углам φ и ψ рассчитать значения двух углов α и β , определяющих ориентацию объекта. Из качественных соображений ясно, что для этого необходимо иметь два уравнения, связывающих углы φ и ψ с углами α и β . Пока удалось получить однозначное решение лишь прямой задачи, состоящей в расчёте углов φ и ψ по углам прецессии α и нутации β . Уравнения для направляющих векторов прямых l_1 и m_1 в системе координат (x, y, z) имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{l}_1 &= \frac{-\vec{i} \cdot \cos \beta - \vec{k} \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha}}; \\ \vec{m}_1 &= \frac{\vec{j} \cdot \cos \beta - \vec{k} \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cdot \cos^2 \alpha}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Они определяют косинус угла между лазерными прямыми и, следовательно, сам угол:

$$\cos \psi = \cos \angle(\vec{l}_1, \vec{m}_1) = \frac{\sin^2 \beta \cdot \sin 2\alpha}{2\sqrt{\cos^4 \beta + 0,25 \sin^2 \beta + 0,25 \sin^4 \beta \cdot \sin^2 2\alpha}} \quad (2)$$

причём для этого не обязательно переходить в базис объекта, т.е. в систему координат (x_1, y_1, z_1) . Соотношение (2) уже даёт представление о сложности решения обратной задачи, т.е. разрешения уравнения (2) относительно углов прецессии и нутации, хотя для частного случая $\alpha = 45^\circ$ это сделать довольно просто:

$$\cos \psi = \cos \angle(\vec{l}_1, \vec{m}_1) = 0,5 \tan^2 \beta / (0,5 \tan^2 \beta + 1). \quad (3)$$

Анализ выражения (3) подтверждает, по крайней мере, для частного случая $\alpha = 45^\circ$ правильность выкладок:

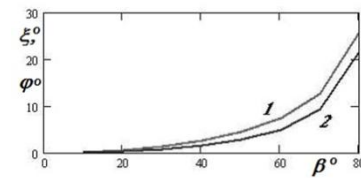
$$\begin{aligned} \beta \rightarrow 0; & \Rightarrow \cos \psi \rightarrow 0; \Rightarrow \psi = \angle(\vec{l}_1, \vec{m}_1) \rightarrow \pi/2, \\ \beta \rightarrow 90^\circ; & \Rightarrow \cos \psi \rightarrow 1; \Rightarrow \psi = \angle(\vec{l}_1, \vec{m}_1) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Чтобы получить второе уравнение связи экспериментально измеряемых углов φ и ψ с углами прецессии α и нутации β следует с использованием стандартных выражений аналитической геометрии [7] перейти в базис связанный с объектом, но громоздкость выражений при этом нарастает:

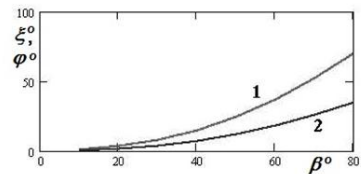
$$\begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \angle(\vec{i}_1, \vec{i}) & \cos \angle(\vec{j}_1, \vec{i}) & \cos \angle(\vec{k}_1, \vec{i}) \\ \cos \angle(\vec{i}_1, \vec{j}) & \cos \angle(\vec{j}_1, \vec{j}) & \cos \angle(\vec{k}_1, \vec{j}) \\ \cos \angle(\vec{i}_1, \vec{k}) & \cos \angle(\vec{j}_1, \vec{k}) & \cos \angle(\vec{k}_1, \vec{k}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Тем не менее, прямая задача была доведена до конца, а численный анализ полученных выражений проводился в Mathcad. Ниже приведены результаты анализа в графической форме. Они позволяют в процессе решения прямой задачи оценить потенциальные возможности измерений углов прецессии и нутации по экспериментально зафиксированным положениям линий-следов φ и ψ .

На рисунке 5 показаны зависимости углов $\xi = 90^\circ - \psi$ и φ от угла нутации β для двух значений угла α : 45° – а) и 5° – б).



а

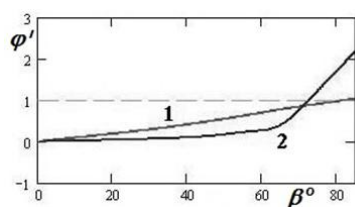


б

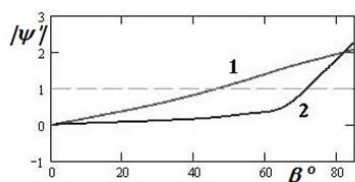
Рисунок 5. Зависимости $\xi(\beta)$ и $\varphi(\beta)$ для $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ б): 1 - $\xi(\beta)$; 2 - $\varphi(\beta)$

Из приведённых графиков видно, что угол между линиями-следами более чувствителен к повороту объекта по сравнению с изменением углового положения каждой из линий относительно осей координат системы (x_1, y_1, z_1) . Это объясняется тем, что поворот объекта относительно линии узлов N вызывает встречные угловые смещения обеих линий-следов l_1 и m_1 . Наибольшая чувствительность к углу поворота объекта наблюдается в случае, когда ось поворота N является биссектрисой угла, образованного лазерными линиями-следами (рисунок 5а и 5б).

Значения производной углов ψ и φ по β позволяют количественно оценить чувствительность измерений угла β . В графической форме зависимости $|\psi'(\beta)|$ и $\varphi'(\beta)$ представлены на рисунке 6.



а



б

Рисунок 6. Зависимости $|\psi'(\beta)|$ – а) и $\varphi'(\beta)$ – б): 1 - $\alpha = 45^\circ$; 2 - $\alpha = 5^\circ$

Рисунок 6 демонстрирует, что при 45° ориентации оси поворота объекта N можно предложить геометрию измерений ($\beta > 40^\circ$), когда значения модуля производной $|\psi'(\beta)|$ близки или превышают единицу. В этой геометрии поворот объекта на малый угол вызывает сопоставимые по величине или даже большие угловые смещения линий-следов. Подобное поведение наблюдается и при небольших углах прецессии, например, при $\alpha = 5^\circ$, но лишь при скользких углах падения лазерного пучка на поверхность. Кроме того, значения производных позволяют оценить требуемые погрешности измерений углового положения линий-следов $\Delta\psi$, исходя из заданных погрешностей измерения ориентации $\Delta\beta$, т.к. $\Delta\psi \approx |\psi'(\beta)| \Delta\beta$. Для первоначальной установки камеры относительно базовой плоскости перспективно использовать калибровочные шаблоны с нанесёнными метками различной конфигурации [8].

4 Заключение

В статье предложено применение структурированного лазерного пучка крестообразной формы для измерения расстояний и ориентации объектов. Продемонстрировано, что крестообразная форма пучка позволяет увеличить диапазон измеряемых расстояний по сравнению с простым пучком кругового поперечного сечения. Методами вычислительного

эксперимента исследована чувствительность ориентационных измерений по угловым координатам фиксируемых лазерных линий-следов. Результаты исследований позволяют оптимизировать оптические схемы измерений и оценивать погрешности.

Представляется перспективным и применение крестообразного в сечении пучка для неинвазивной диагностики *in vivo* вязко-упругих [9] и рельефных [10] свойств биотканей, в частности кожного покрова человека. При подобных применениях ориентационная задача становится первым этапом диагностической процедуры, который служит для воспроизведения, протоколирования или/и оптимизации геометрии измерений на топологически сложном и подвижном объекте – человеческом организме.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ р_а № 17-42-630907

Список использованных источников

1. Леонтьева Г.В. Лазерный измеритель непрямолинейности – «Лазерная струна» [Текст] / Г.В. Леонтьева, Л.В. Пинаев, А.Г. Серёгин // Оптический журнал, 2012. № 10. С. 52 – 57.
2. Солдатов В.П. Определение зависимости погрешности измерения перемещений оптико-электронными приборами с многоэлементными приемниками излучения от соотношения сигнал–шум [Текст] / В.П. Солдатов // Измерительная техника, 2012. № 5. С. 52 – 54.
3. Методы компьютерной оптики [Текст] / Под ред. В.А.Сойфера. - М.: Физматлит, 2000. 688 с.
4. Мошкин В.И., Техническое зрение роботов [Текст] / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1990. - 272 с.
5. Дёмкин В.Н. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы (обзор) [Текст] / В.Н. Дёмкин, В.Е. Привалов. - Вестник СПбО АИН. СПб.: СПбГПУ, 2008. Вып. 5. С. 138 – 187.
6. Бурнаевская Е.В. Применение структурированных в пространстве и времени лазерных пучков в виброметрии. [Электронный ресурс] / Е.В. Бурнаевская, В.Н. Гришанов – Динамика и виброакустика. Самара: И-во СГАУ, 2015. Т. 2. № 1. С. 19 – 28.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. М.: АСТ: Астрель, 2006. 991 с.
8. Давыденко Е.В. Решение задачи автоматического определения положения видеокамеры в системе оптической лазерной

триангуляции [Текст] / Е.В. Давыденко, А.Л. Приоров // Измерительная техника, 2009. № 8. С. 44 – 47.

9. Мордасов М.М. Измерение геометрических параметров поверхностей раздела газожидкостных систем [Текст] / М.М. Мордасов, А.П. Савенков. // Измерительная техника, 2015. № 7. С. 47 – 49.

10. Соломатин В.А. Точность измерений рельефа при лазерном сканировании [Текст] /В.А. Соломатин // Измерительная техника, 2016. № 6. С. 42 – 44.

Vladimir N. Grishanov

Samara National Research University
(Samara University)
Moskovskoe shosse, 34, Samara,
443086, Russian Federation
vladgrishanov@yandex.ru

CROSS-SECTION THE LASER BEAM OF THE STRUCTURE FOR MEASURING THE DISTANCE AND ORIENTATION OF THE ROBOT MANIPULATOR

For stand-alone measure the distance of the robot manipulator or a robot as a whole and its orientation with respect to a reference surface is proposed to use optical-electronic system - standing with a camera and a laser module based on diode laser optics, forming a cross-shaped structure of the cross-section of the radiation beam. Opto- electronic system is mounted on the manipulator. At this point of intersection lines formed on a structured surface of an article by a laser beam in a cross can be used to measure distances and angular coordinates lines - for measuring the relative orientation of the manipulator of the measuring system. Measuring distances on the cross point, in fact, little different from the distance measurements on the position of the laser spot on the surface of the product in laser triangulation distance meter, the metrological parameters are studied in some detail, but in this case the particular topology of the cross-section of the laser beam widen the range of measurable distances. Metrological potential orientation measurements using intersecting lines on the surface of the base has not been studied, and that was the basis for this study.

Key words: robot, manipulator, contactless remote measurements, distance, orientation, Euler angles.

References

1. Leontieva, G.V., Pinaev, L.V. and Seregin A.G. (2012), Laser meter of non-rectilinearity, Laser string, *Journal of Optical Technology*, no. 10, pp. 52 – 57.
2. Soldatov, V.P. (2012), Determination of the dependence of the measurement error of displacements by optoelectronic devices with multi-element radiation receivers on the signal-to-noise ratio, *Measurement Techniques*, no. 5, pp. 52 - 54.
3. Souyfer, V.A. (2000), Methods of computer optics, *Fizmatlit*, Moscow, 688 p.
4. Moshkin, V.I., Petrov, A.A. Titov, V.S. and Jakushenkov, Y.G. (1990), Tehnitcheskoe zrenie robotov [machine vision], in. Jakushenkova, Y.G. (ed.), Mashinostroenie, Moscow, 272 p..
5. Demkin, V.N. and Privalov, V.E.. (2008), Lazernye tehnologii pri izmerenii geometrii poverhnosti slognoj formy [Laser technologies for measuring the geometry of a complex-shaped surface] (review), *Vestnik SPbO AIN*. SPb.: SPbGPU, vol. 5, pp. 138 – 187.
6. Burnaevskaja, E.V. and Grishanov, V.N. (2014), Applications of structured in space and time laser beam in vibrometer, *Dinamika i vibroakustika*, vol. 2, no. 1, pp. 19 – 28.
7. Vygodsky, M. Ya. (2006), Handbook of Higher Mathematics, AST: Astrel, Moscow, Russia, 991 p.
8. Davydenko, E.V. and Priorov, A.L. (2009), Solution of the problem of automatic determination of the position of the video camera in the system of optical laser triangulation, *Measurement Techniques*, no. 8, pp. 44 - 47.
9. Mordasov, M.M. and Savenkov, A.P (2015), Measurement of geometric parameters of interfaces of gas-liquid systems, *Measurement Techniques*, no. 7, pp. 47 - 49.
10. Solomatin, V.A. (2016), Accuracy of measurement of relief in laser scanning, *Measurement Techniques*, no. 6, pp. 42 - 44.