

**Д. Д. Климов**, аспирант, daniil.klimov@gmail.com,  
**Ю. В. Подураев**, д-р техн. наук, проф., проректор,  
 Заслуженный работник высшей школы РФ, зав. каф., y.poduraev@stankin.ru,  
 Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

## Синтез структуры робототехнического комплекса высокоскоростной съемки динамических объектов

*На основе изучения классических подходов к построению автоматизированных комплексов высокоскоростной съемки предложена оригинальная структура с двумя зеркалами, нивелирующая ряд недостатков известных структур. Приведены математические зависимости габаритных параметров, решение обратной задачи кинематики, алгоритм минимизации скоростей элементов комплекса. Также предлагается метод оценки параметров рабочей зоны.*

**Ключевые слова:** робот, динамический объект, высокоскоростная камера, съемка, зеркало, оптимизация, оптические измерения

### Введение

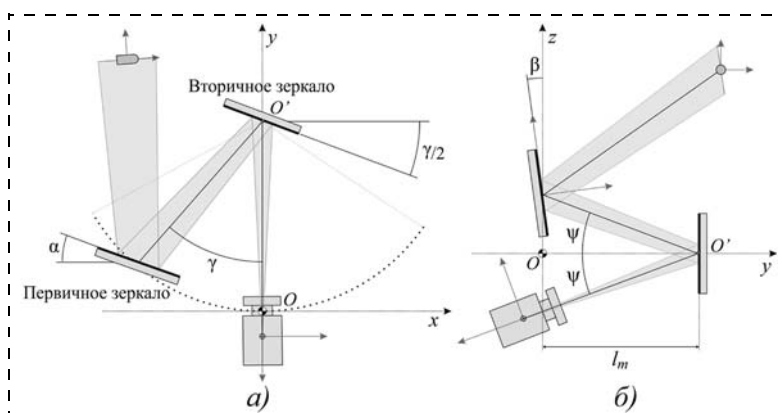
Во многих областях знаний, в частности, в военной и спортивной областях, а также в кинематографии и телевидении, существуют задачи, требующие фиксировать поведение динамичного объекта с помощью высокоскоростной камеры. Например, для того чтобы правильно определить причины отказов снарядов, часто необходимо фиксировать его поведение на значительном участке траектории полета. Другим примером может быть изучение вращения спортивного мяча во время его полета или изучение полета птицы. Высокоскоростная съемка динамических объектов представляется актуальной задачей, различные ее применения последнее время демонстрировались на многих мировых выставочных площадках, в частности НАТ-Экспо [1] и RAE-2015 [2]. В существующих промышленных системах нередко не совмещены большой объем рабочей зоны и высокая скорость вектора поля зрения съемочного оборудования. В связи с этим

на сложных траекториях страдают показатели качества получаемой видеoinформации, такие как изобразительная способность, микросдвиг, освещенность кадра, глубина резкости, угловая разрешающая способность. Например, российские комплексы Вереск-ЭК и МАИК "Траектория" [3] обладают большой рабочей зоной, однако их максимальная азимутальная скорость вектора поля зрения находится в пределах  $100^\circ/\text{с}$  и  $80\%$  соответственно. Напротив, такие промышленные системы, как Tracker<sup>2</sup> Flight Follower [4] или TrackEye Trajectory Tracker [5], использующие подвижное зеркало, имеют заметно более высокие скоростные параметры ( $9000^\circ/\text{с}$ ), но рабочая зона ограничена исключительно азимутальной степенью подвижности. Японские ученые из токийского университета, применяя два зеркала (азимут/угол места), создали систему, позволяющую отслеживать объект со скоростями до  $11\,400^\circ/\text{с}$ , однако угол обзора системы также относительно мал — он не превышает  $40^\circ$  [6].

Основной задачей было совместить большой объем рабочей зоны, присущий системам с подвижной оптической частью, и высокую скорость, характерную для структур с подвижным зеркалом. В данной работе предлагается оригинальная двухзеркальная оптическая схема для робототехнического комплекса, которая позволяет выиграть в объеме рабочей зоны, скорости, а также, опционально, компенсировать искажения ориентации объекта в кадре.

### Оптическая схема

В схему входят два зеркала (рис. 1). Вторичное зеркало установлено перпендикулярно плоскости  $xu$  в точке  $O'$  ( $0, 0, l_m$ ) и имеет одну вращательную степень свободы,



**Рис. 1. Оптическая схема:**  
 а — вид сверху; б — вид сбоку

параллельную оси  $z$ . Первичное зеркало может перемещаться по круговой траектории вокруг центра вторичного зеркала на угол  $\gamma$ . Оно имеет две вращательных степени свободы —  $\alpha$  (азимут) и  $\beta$  (возвышение). Траектория смещена по оси  $z$  на  $l_m \sin \psi$ . Оптическая ось камеры повернута вокруг точки  $O'$  на угол  $\psi$ .

Оба зеркала ориентируются в пространстве таким образом, чтобы свет от объекта съемки отражался в объектив камеры в каждый момент времени. Непараллельность плоскостей первичного и вторичного зеркал вводит искажение в ориентацию снимаемого объекта в кадре. Пользуясь тем фактом, что система позволяет наводиться на одну и ту же точку в пространстве под разным углом  $\gamma$ , искажение можно компенсировать, меняя этот угол в процессе съемок. В данной оптической схеме эффект тем более заметен, чем больше угол возвышения.

### Структура робототехнического комплекса

В робототехническом комплексе оптическую схему предлагается реализовывать на базе промышленного манипулятора (рис. 2). При этом первичное зеркало устанавливается на фланец манипулятора таким образом, чтобы ось вращения шестой степени подвижности робота совпадала с азимутальной ( $\alpha$ ) степенью подвижности первичного зеркала. Вторичное зеркало устанавливается на дополнительную ось, также управляемую контроллером робота, для обеспечения синхронизации. Высокоскоростная камера устанавливается на неподвижном штативе перед вторичным зеркалом.

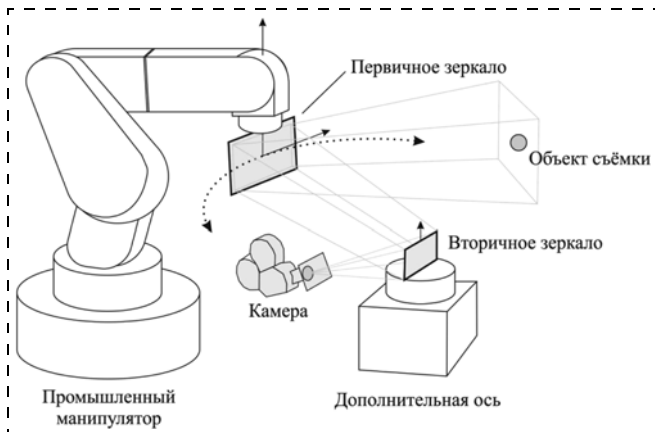


Рис. 2. Структура робототехнического комплекса

### Обратная задача кинематики

Координаты первичного зеркала определяются следующим образом:

$$x_{mir} = l_m \sin \gamma; y_{mir} = l_m - l_m \cos \gamma; z_{mir} = -l_m \sin \psi, \quad (1)$$

где  $\psi$  — угол наклона оптической оси камеры;  $\gamma$  — угол поворота первичного зеркала вокруг центра вторичного зеркала. Вектор направления на объект съемки имеет вид

$$v = \begin{bmatrix} (x_{obj} - x_{mir}) \cos \gamma - (y_{obj} - y_{mir}) \sin \gamma \\ (x_{obj} - x_{mir}) \sin(-\gamma) + (y_{obj} - y_{mir}) \cos \gamma \\ z_{obj} - z_{mir} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $x_{obj}, y_{obj}, z_{obj}$  — координаты объекта съемки;  $x_{mir}, y_{mir}, z_{mir}$  — координаты первичного зеркала (1).

Вектор оптической оси камеры имеет вид

$$c = \begin{bmatrix} 0 \\ -l_m \cos \psi \\ -l_m \sin \psi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Вектор нормали к поверхности первичного зеркала определяется векторной суммой нормализованных векторов направления на объект съемки (2) и оптической оси камеры (3):

$$m = \hat{v} + \hat{c}, \quad (4)$$

где  $\hat{v}$  — нормализованный вектор направления на объект съемки,  $\hat{c}$  — нормализованный вектор оптической оси камеры.

Вращательные степени подвижности первичного зеркала можно записать в виде

$$\begin{cases} \alpha = \gamma - \arctg\left(\frac{m_x}{m_y}\right) + \psi; \\ \beta = 90 - \arctg\left(\frac{m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}\right), \end{cases} \quad (5)$$

где  $m_x, m_y, m_z$  — компоненты вектора нормали к поверхности первичного зеркала (4);  $\psi$  — угол наклона оптической оси камеры;  $\gamma$  — угол поворота первичного зеркала вокруг центра вторичного зеркала, а углы  $\alpha$  и  $\beta$  — вращательные степени подвижности первичного зеркала, которые ограничиваются конструктивными параметрами и должны входить в определенный диапазон.

### Рабочая зона

Введем функцию видимости по направлению  $V(\theta, \phi, \gamma)$ , определенную как

$$V(\theta, \phi, \gamma) = \begin{cases} 1, & \alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}] \wedge \beta \in [\beta_{min}, \beta_{max}]; \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  считаются по формуле (5).

Так как из-за второго зеркала появляется возможность наводиться на одну и ту же точку в пространстве под разным углом, в сферической системе координат степень достижимости  $A(\theta, \phi)$  по направлению предлагается определять процентом углов гамма (от общего диапазона), при которых функ-

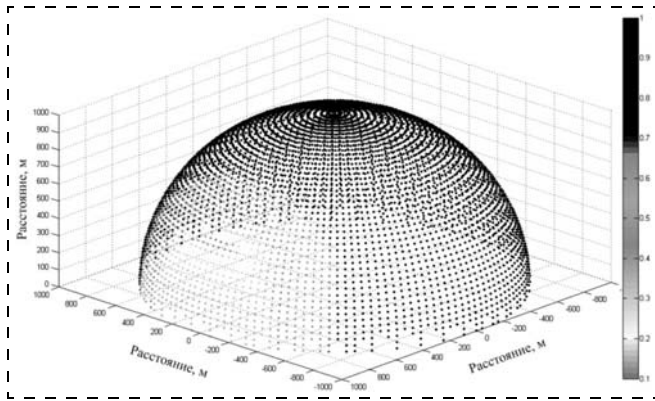


Рис. 3. Коэффициент достижимости рабочей зоны

ция видимости  $V(\theta, \varphi, \gamma)$  (6) дает ненулевой результат. Это можно выразить следующей формулой:

$$A(\theta, \varphi) = \frac{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} V(\theta, \varphi, \gamma) d\gamma}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}. \quad (7)$$

В способе определения параметров рабочей зоны можно провести параллель с "коэффициентом сервиса" в промышленной робототехнике. На рис. 3 показана рабочая зона комплекса с двухзеркальной структурой. Для того чтобы комплекс был в состоянии навестись на любую точку на полусфере вокруг нулевой точки при условии, что угол между первичным и вторичным зеркалом не превышал  $90^\circ$ , диапазон угла  $\gamma$  должен быть равен (минимум)  $\pm 60^\circ$ .

### Габаритные параметры

Минимальные требуемые размеры первичного и вторичного зеркал определяются (минимальным) фокусным расстоянием объектива и физическим размером матрицы высокоскоростной камеры, использующейся для съемки. Для вторичного зеркала верны следующие соотношения:

$$W_{SMir} = \frac{\left(\frac{L}{\cos\psi} - 1\right) W_m}{\cos(\gamma_{\max}/2)}; \quad (8)$$

$$H_{SMir} = \frac{W_{SMir}}{A \cos\psi},$$

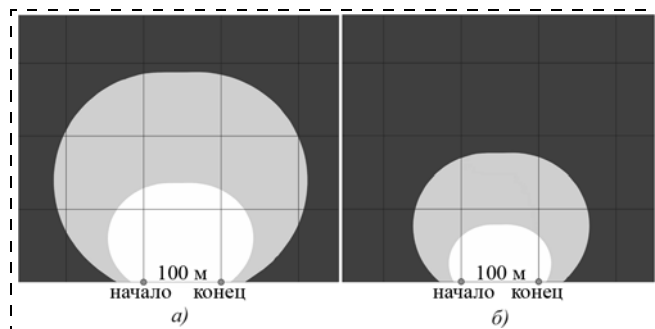


Рис. 4. Зона, разрешенная для установки системы: а — однозеркальная структура; б — двухзеркальная структура

где  $W_{SMir}$  — ширина вторичного зеркала;  $H_{SMir}$  — высота вторичного зеркала;  $W_m$  — ширина матрицы (пленки);  $A$  — аспект матрицы (пленки);  $F$  — фокусное расстояние.

Для первичного зеркала верны следующие соотношения:

$$W_{PMir} = \frac{\left(\frac{2L}{\cos\psi} - 1\right) W_m}{\cos\left(\alpha - \frac{\gamma_{\max}}{2}\right)}; \quad (9)$$

$$H_{PMir} = \frac{W_{PMir}}{A \cos(\psi + \beta_{\max})},$$

где  $W_{PMir}$  — ширина первичного зеркала;  $H_{PMir}$  — высота первичного зеркала;  $W_m$  — ширина матрицы (пленки);  $A$  — аспект матрицы (пленки);  $F$  — фокусное расстояние.

### Скоростные характеристики

Одним из преимуществ предлагаемой оптической схемы является возможность использования угла  $\gamma$  для уменьшения максимальной угловой скорости вращения первичного зеркала. При зафиксированном угле  $\gamma$  схема превращается в однозеркальную. Изменяя угол  $\gamma$  во время слежения за объектом, можно понизить максимальную угловую скорость  $\alpha$ . Теперь встает задача создания алгоритма минимизации угловых скоростей элементов комплекса путем согласованного движения зеркал. Так как траектория может быть произвольной, возможен исключительно локальный подход. В данном случае для каждой соседних точек траектории в некой зоне поиска определяется такое смещение  $\gamma$ , при котором максимум скорости всех элементов комплекса  $(\alpha, \beta, \gamma)$  минимален. Использование этого метода локальной оптимизации дает снижение максимальных угловых скоростей до 50 % для линейных траекторий и около 35 % — в среднем.

В качестве демонстрации полезности этого подхода было проведено сравнение классической однозеркальной и новой двухзеркальной структур.

Для этого взят участок горизонтальной траектории от точки "начало" до точки "конец" длиной 100 м при скорости объекта 1000 м/с. На рис. 4 темный участок — разрешенная зона установки для системы при максимальной угловой скорости элементов комплекса  $100^\circ/\text{с}$ . Как видно, двухзеркальная схема позволяет снимать динамический объект с расстояния 170 м, при однозеркальной — почти 300 м (размер сетки  $100 \times 100$  м). Без применения зеркал зона увеличивается в два раза по сравнению с однозеркальной схемой.

Так как качество изображения изделия на снимке требует наиболее близкого расположения регистрирующей аппаратуры к исследуемому участку траектории [7], предложенная структура с двумя зеркалами представляется более предпочтительной.

## Заклучение

Повышение скорости вектора поля зрения, при прочих равных, позволит снимать динамические объекты с более близкого расстояния, что положительно повлияет на показатели качества получаемой видеoinформации, такие как микросдвиг, освещенность, глубина резкости, угловая разрешающая способность. Увеличенная рабочая зона удлинит участок видеофиксации и позволяет реализовывать сложные пространственные траектории.

Предложенная оптическая схема может применяться не только для съемок, но и для проецирования изображений на динамические объекты. При этом камера заменяется проектором. В отличие от некоторых промышленных аналогов, робототехнический комплекс с новой структурой позволит проводить съемку динамических объектов, двигающихся не только по линейным, но и по более сложным траекториям, в широком диапазоне скоростей, со-

вмещающая в себе преимущества систем как с подвижной оптической частью, так и с подвижным зеркалом.

## Список литературы

1. URL: [http://www.rusrs.ru/news-sirius/vysokoskorostnoe\\_oborudovanie\\_dlya\\_televeshchaniya\\_i\\_kinoproizvodstva\\_na\\_natexpo\\_2015/](http://www.rusrs.ru/news-sirius/vysokoskorostnoe_oborudovanie_dlya_televeshchaniya_i_kinoproizvodstva_na_natexpo_2015/) (дата обращения 12.12.15)
2. URL: <http://www.ntiim.ru/info.php?x=traektor> (дата обращения 11.12.15)
3. Чупахин А. П., Савин М. Л. Особенности построения оптоэлектронных регистрирующих систем для траекторных измерений // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 2. С. 273—279.
4. URL: <http://specialised-imaging.com/products/tracker2-award-winning-flight-follower-system> (дата обращения 03.12.15)
5. URL: <http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis/products/track-eye.aspx> (дата обращения 10.12.15)
6. Okumura K., Oku H., Ishikawa M. High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera // Robotics and Automation (ICRA). 2011 IEEE International Conference. P. 6186—6191.
7. Елисеев А. К., Чупахин А. П., Лебедев А. А. Расчет параметров работы наземных следящих оптических видеорегистраторов для испытаний боеприпасов // Матер. 3-й Всеросс. науч.-техн. конф. Рдудловские чтения—2012. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2013. 240 с.

## Synthesis of a Robotic System Structure for a High-Speed Recording of the Dynamic Objects

D. D. Klimov, daniil.klimov@gmail.com, Yu. V. Poduraev, poduraev@stankin.ru✉, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow 127994, Russian Federation

Corresponding author: Poduraev Yury V., D. Sc., Professor, Head of Robotics and Mechatronics Sub-department, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, 127994, Russian Federation e-mail: poduraev@stankin.ru

Received on January 18, 2015  
Accepted on February 01, 2015

*In many fields of knowledge there are tasks, which require filming of the behavior of a dynamic object with the use of high-speed cameras. Usually, the existing industrial systems do not combine a large work area and a high speed of filming of the equipment's field of view. In this regard, the quality parameters of the resulting footage, such as motion blur, illuminance, depth of field, angular resolution, suffer on complex trajectories. The goal of our work was to design a new robotic system structure, based on a study of the classical approaches of the automated high-speed flight follower systems. An original structure with two mirrors, leveling several disadvantages of the known structures, was proposed. The paper describes the mathematical dependencies of the size parameters, inverse kinematics and an algorithm for minimizing the velocity of the elements of the system. It also offers a method for estimation of the parameters of the work area. A robotic system based on the proposed optical layout will allow filming objects moving not only along the linear, but also more complex trajectories, in a wide range of speeds, combining the advantages of both the optical system with a moving camera and the panning mirror systems. The proposed optical layout allows us to reduce the angular velocities of the primary mirror during tracking, and it can be used not only for filming, but also for projecting images on dynamic objects.*

**Keywords:** robot, flight follower, dynamic object, high speed camera, optical layout, mirror, optical measurements

For citation:

Klimov D. D., Poduraev Yu. V. Synthesis of a Robotic System Structure for a High-Speed Recording of the Dynamic Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 316—319.

DOI: 10.17587/mau/16.316-319

## References

1. Available at: [http://www.rusrs.ru/news-sirius/vysokoskorostnoe\\_oborudovanie\\_dlya\\_televeshchaniya\\_i\\_kinoproizvodstva\\_na\\_natexpo\\_2015/](http://www.rusrs.ru/news-sirius/vysokoskorostnoe_oborudovanie_dlya_televeshchaniya_i_kinoproizvodstva_na_natexpo_2015/) [12.12.15]
2. Available at: <http://www.ntiim.ru/info.php?x=traektor> [11.12.15]
3. Chupahin A. P., Savin M. L. Osobennosti postroeniya optoelektronnykh registrirujushchih sistem dlja traektornykh izmerenij (Features of construction of optoelectronic registration systems for trajectory

measurements), *Izvestija TulGU. Tehniceskie Nauki*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 273—279 (in Russian).

4. Available at: <http://specialised-imaging.com/products/tracker2-award-winning-flight-follower-system> [03.12.15]

5. Available at: <http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis/products/track-eye.aspx> [10.12.15]

6. Okumura K., Oku H., Ishikawa M. High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera, *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on, 2011, vol. 9—13, pp. 6186—6191.

7. Eliseev A. K., Chupahin A. P., Lebedev A. A. Raschjot parametrov raboty nazemnykh sledjashchih opticeskich videoregistratorov dlja ispytanij boeprizasov (The calculation of the parameters of the range optical tracking recorders for ammunition testing), *Rdultovskie Chtenija—2012: Materialy Tret'ej Vserossijskoj Nauchno-Tehniceskoj Konferencii*, 2013, 240 p. (in Russian).