

Ф. М. Бельченко, аспирант, программист, philepp@mail.ru,
И. Л. Ермолов, д-р техн. наук, проф. РАН, ermolov@ipmnet.ru,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

Новый подход к преобразованию перспективы изображений в системах телеметрии роботов*

Телеуправляемые (дистанционно управляемые) роботы составляют значительную часть современного парка роботов и используются для разведки местности и контроля состояния важных объектов, в качестве военных роботов, роботов-саперов и т. д. Применение телеуправления с участием оператора связано с несовершенством современных автономных робототехнических комплексов, поскольку в определенных ситуациях необходимо быстро и точно принимать решения.

В данной работе исследуются проблемы отображения видеоинформации на мониторах операторов робототехнических комплексов. Рассматриваются особенности представления объемного изображения на плоскости, основанные на теории представления перцептивного пространства. Исследуются технологии в области систем телеметрии и технического зрения, использованные при составлении карт местности по проекту Stanley в рамках конкурса DARPA.

Целью работы является изучение возможностей повышения скорости реакции и снижения процента ошибок операторов при управлении робототехническими комплексами, вызванных недоверием или низким качеством передаваемого изображения. Научная новизна исследования заключается в новых знаниях о применимости целевых искажений в изображениях, передаваемых человеку-оператору, что позволяет повысить эффективность восприятия информации человеком-оператором и, как следствие, улучшить управление технической системой.

Основное внимание уделяется разработке программного обеспечения, реализующего технологию преобразования перспективы изображений. Рассматриваются возможности применения матриц перспективного преобразования при работе с телеуправляемым робототехническим комплексом. Разработана статическая модель программного обеспечения. Для улучшения достоверности передачи информации и исправления дисторсии на передаваемом видеоизображении разработана программа работы видеокамеры с внесением искажений перспективы. По итогам работы испытан прототип системы телеметрии для отработки различных сценариев внесения целевых искажений перспективы. Исследования технологии проводятся совместно с Институтом медико-биологических проблем РАН.

Ключевые слова: телеметрия, робототехнический комплекс, преобразование перспективы, система технического зрения

Введение

Телеметрия в настоящее время является крайне важным направлением в робототехнике. Большое число управляемых робототехнических комплексов оснащены камерами, передающими видеоизображения на пультах операторов робототехнических комплексов. Как правило, это роботы для разведки местности и контроля состояния важных объектов, военные роботы, роботы-саперы. Применение телеуправления с участием оператора связано с несовершенством современных автономных робототехнических комплексов [2], поскольку в определенных ситуациях необходимо быстро и точно принимать решения.

Но в то же время человек в цепи управления роботом является наиболее слабым звеном. Он сильно ограничен техническими возможностями информационных средств робота, ему свой-

ственно допускать ошибки в принятии решений, он подвержен стрессу, усталости. Поэтому необходимо проводить разработки, облегчающие и повышающие эффективность работы оператора [1].

Прикладные исследования по тематике проекта, нашедшие применение в технических системах, наиболее активно проводятся несколько последних десятилетий. Впервые результаты данных исследований были внедрены в космической отрасли академиком Б. В. Раушенбахом. Во время стыковки космических аппаратов для наблюдения за другим кораблем применялись оптические приборы, которые давали изображение по законам геометрической оптики (линейной перспективы) (рис. 1). Поскольку стыковка кораблей требовала идеальной точности, Б. В. Раушенбах пытался ответить на вопрос [4]: насколько точны эти изображения?

Б. В. Раушенбахом при разработке системы телеметрии для космического корабля "Союз" было отмечено, что передача любого трехмерного изображения с помощью двухмерного средства воспроизведения изображения (например,

*Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690138-6).

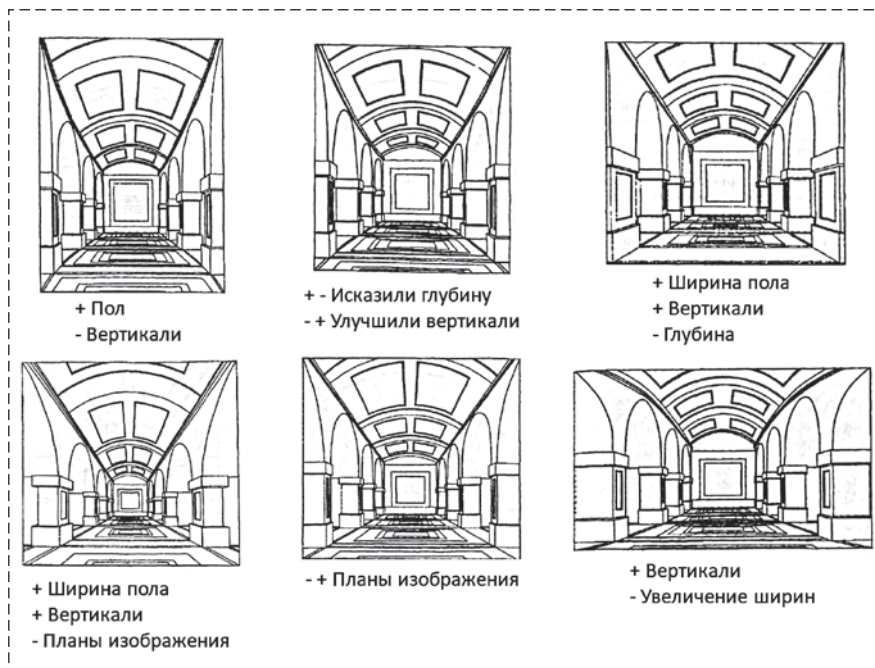


Рис. 1. Варианты отображения перцептивного пространства [4]:

(+) — повышение достоверности характеристики; (-) — понижение достоверности характеристики

Fig. 1. Methods for displaying perceptual space [4]:

(+) — improving the quality of the characteristics; (-) — downgrade of characteristics

экрана ЭВМ) сопровождается появлением искажений [4]. При этом в зависимости от типа искажений можно акцентировать восприятие оператора на тех или иных деталях изображения (боковой части изображения, нижней части изображения, перспективы и пр.) (рис. 1).

В ряде исследований перспективные преобразования используют совместно с перспективными проекциями. В системах навигации роботов, особенно при планировании движения, часто требуется преобразовать вид сцены, получаемый камерой робота, в вид сверху. На рис. 2 показано, как снятая роботом сцена преобразуется в вид сверху, который впоследствии можно использовать для планирования движения в этой плоскости. Дополнительно используются данные, полученные от сонара, лазерного дальномера и других датчиков, работающих в плоскости движения. Данные исследования отражены в работах по Стенфордскому проекту Stanley в рамках конкурса DARPA Grand Challenge 2005 г. [5].

В данном случае камера, установленная на автомобиле-роботе, считывает информацию о дороге. С помощью лазерных дальномеров идентифицируется область возможного расположения дороги перед автомобилем, которая помечена прямоугольником (рис. 2, а). Далее

алгоритмы машинного зрения сегментируют плоские участки, похожие на дорогу (рис. 2, б). Сегментированные участки дороги преобразуются в вид сверху с помощью преобразования перспективы и объединяются картой на основе данных от лазера (рис. 2, в).

Исследования в области использования перспективных проекций при выделении объектов реального мира рассмотрены в работе [14]. В работах авторов перспективные проекции рассмотрены в качестве одного из средств построения "пространственной оболочки" для определения формы объектов [15].

Также следует отметить исследования Института автоматики и электроники СО РАН, связанные с передачей информации от видеокamer на дисплей. Эта проблема продолжительное

время остается актуальной ввиду технических особенностей считывающих элементов видеокamer и сложности преобразования изображения пространства на плоские дисплеи. Данные преобразования всегда приводят к частичной потере достоверности передаваемого изображения. Указанные проблемы отражены в работах А. М. Ковалева [3].

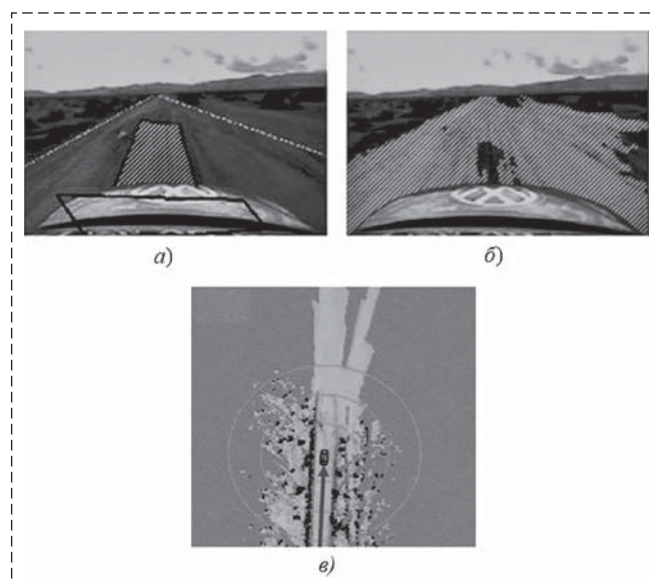


Рис. 2. Пример преобразования перспективы в вид сверху

Fig. 2. Example of converting a perspective to a top view

Большое число работ посвящено изучению особенностей зрения человека и учету этих особенностей при разработке элементов систем технического зрения. В частности, данные вопросы изучаются сотрудниками Института проблем передачи информации РАН при решении задач, имеющих приложения в технических зрительных системах. В работах Г. И. Рожковой поднимаются медицинские вопросы восприятия человеком различной зрительной информации и проблемы восприятия стереоскопических изображений [13].

Таким образом, предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли и ряде проектов, связанных с навигацией [8]. Основные алгоритмы для внесения целевых искажений будут работать с преобразованиями перспективы на видеоизображениях [10].

Постановка задачи

Целью работы является снижение процента ошибок операторов при управлении робототехническими комплексами, вызванных недостоверностью или низким качеством передаваемого изображения. В качестве решения предлагается проводить дополнительную обработку видеоизображений путем применения преобразования перспективы. Таким образом, можно компенсировать часть искажений, возникающих в результате переноса объемной информации на плоское изображение.

В общем случае конверсионная формула преобразования перспективы изображения выглядит следующим образом [11]:

$$[x' \ y' \ w'] = [u \ v \ w] \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Здесь u и v — координаты крайней точки преобразованного изображения; w определяет тип перспективного преобразования; c_{ij} — параметры перспективного преобразования, из которых следует выделить:

$c_{00}, c_{01}, c_{10}, c_{11}$ — осуществляют масштабирование, вращение и сдвиг;

c_{20}, c_{21} — определяют панорамирование;

c_{02}, c_{12}, c_{22} — генерируют перспективное преобразование.

Далее обозначим x и y соответствующие преобразованные обобщенные координаты. Составим уравнения для определения значений данных координат:

$$x = \frac{x'}{w'} = \frac{c_{00}u + c_{10}v + c_{20}}{c_{02}u + c_{12}v + c_{22}}; \quad (2)$$

$$y = \frac{y'}{w'} = \frac{c_{01}u + c_{11}v + c_{21}}{c_{02}u + c_{12}v + c_{22}}. \quad (3)$$

Исходя из полученных равенств можно найти координаты точек, к которым применена перспективная трансформация:

$$c_{20} = x_0;$$

$$c_{00} + c_{20} - c_{02}x'_1 = x_1;$$

$$c_{00} + c_{10} + c_{20} - c_{02}x'_2 - c_{12}x'_2 = x_2;$$

$$c_{10} + c_{20} - c_{12}x'_3 = x_3;$$

$$c_{21} = y_0;$$

$$c_{01} + c_{21} - c_{02}y'_1 = y_1;$$

$$c_{01} + c_{11} + c_{21} - c_{12}y'_2 - c_{12}y'_2 = y_2;$$

$$c_{11} + c_{21} - c_{12}y'_3 = y_3.$$

Таким образом, изменяя параметры c_{ij} , мы можем осуществлять преобразование перспективы [12].

Программная реализация технологии перспективного преобразования в библиотеке OpenCV

Для исследования алгоритмов перспективного преобразования будем использовать открытую библиотеку OpenCV, которая содержит алгоритмы для: интерпретации изображений, калибровки камеры по эталону, устранения оптических искажений, определения сходства, анализа перемещения объекта, определения формы объекта и слежения за объектом, 3D-реконструкции, сегментации объекта, распознавания жестов и т. д. Данный функционал позволяет использовать различные виды видеокамер и облегчает написание некоторых программных модулей.

В качестве основного языка программирования выбран C++. Данный язык является базовым для использования библиотеки OpenCV. Также использование данного языка в дальнейшем облегчит перенос кода на встраиваемые системы. Разработка программного обеспечения проводится в Visual Studio 2019.

Предварительно была разработана статическая UML-модель прототипа программного средства

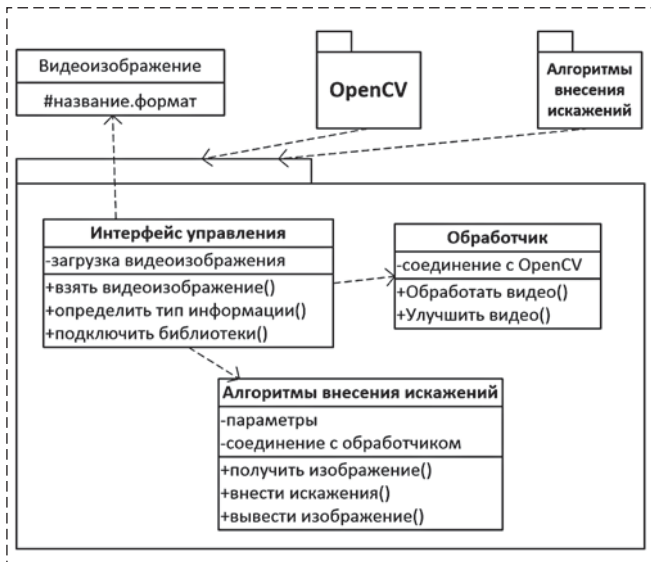


Рис. 3. Статическая UML-модель прототипа программного средства, реализующего функционал с преобразованием перспективы видеоизображений

Fig. 3. A static UML-model of a software prototype that implements a functional with the transformation of the perspective of video images

[16], реализующего преобразование перспективы. Основными внутренними модулями являются:

1. Интерфейс управления. В модуле обеспечивается отображение входного видеоизображения и изображения после обработки алгоритмами внесения искажений (изменения перспективы).
2. Обработчик. Обеспечивает подготовку входного видеопотока перед обработкой. Вносит дополнительные улучшения для отображения в интерфейсе управления (резкость, цветопередача).
3. Алгоритмы внесения искажений. Реализуют финальные преобразования перспективы видеоизображения.

В качестве внешних модулей представлены сама библиотека OpenCV и базовый модуль с реализацией алгоритмов внесения искажений (поворот, масштабирование, растяжение изображения). Статическая UML-модель представлена на рис. 3.

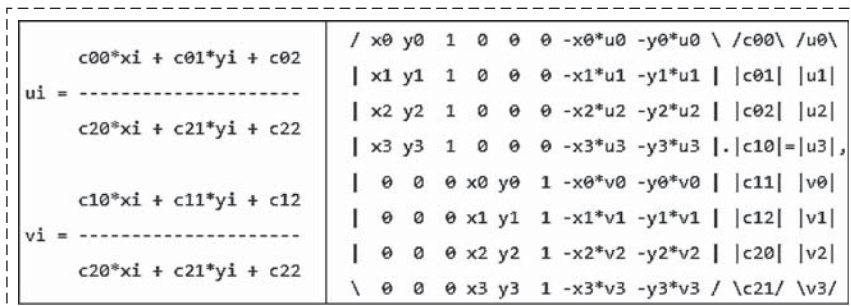


Рис. 4. Матрица перспективного преобразования библиотеки OpenCV
Fig. 4. Perspective transform matrix in the OpenCV library

В OpenCV на основе формул (1)–(3) реализованы вычисления матриц перспективного преобразования, представленные на рис. 4.

Далее загружается видеоизображение. На тестовом прототипе работа проводится с кадрами формата HD, где крайние точки соответствуют следующим пикселям: $[x_0, y_0] \rightarrow [0, 0]$, $[x_1, y_1] \rightarrow [1280, 0]$, $[x_2, y_2] \rightarrow [0, 720]$, $[x_3, y_3] \rightarrow [1280, 720]$.

На базе лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского в настоящее время разработан прототип системы телеметрии для отработки результатов настоящего исследования. В качестве устройства считывания видеоизображений используется камера MicrosoftHD.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведен фрагмент кода, в котором выделяется область для преобразования изображения и задается степень перспективной трансформации. В обоих случаях создаются по четыре объекта класса "точка". В данном примере точки выбраны произвольно для заданной области [6].

Далее системе необходимо из выделенных точек получить матрицу перспективного преобразования и применить ее. Для этого используются функции `getPerspectiveTransform` и `warpPerspective`, принимающие в качестве аргументов изображения и массив точек для преобразования (рис. 5).

Функция `getPerspectiveTransform` в данном случае возвращает матрицу перспективного преобразования, вычисленную по массивам `src` (входной кадр) и `dst` (выходной кадр). Далее `warpPerspective` применяет перспективное преобразование к изображению `src` и получает новое изображение `dst`.

В данном примере точки выбраны произвольно для заданной области. Для разных задач эти точки необходимо подбирать индивидуально [7].

Результаты исследований

Для эксперимента был смоделирован сценарий, при котором имеется робот небольшого размера, который должен осуществить разведку в замкнутом пространстве (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Рассмотрим оригинальное изображение помещения, полученное

с камеры без внесения искажений перспективы (рис. 6, а).

На оригинальном изображении видно, что объекты, расположенные сбоку на переднем плане, претерпели определенную деформацию при отображении на экране. В данном случае наблюдается пример недостоверного переноса изображения объемного пространства. Одной из причин такого отображения является форма линзы, которая захватывает изображение пространства и переносит его на плоскость матрицы.

После применения перспективного преобразования можно увидеть, что объекты, которые расположены вертикально, отобразились более достоверно (рис. 6, б, см. третью сторону обложки). Вне зависимости от горизонтального поворота камеры мы получаем более правильное видеоизображение, что позволяет качественнее оценить окружающую обстановку внутри замкнутых пространств или открытых пространств с большим числом объектов.

В настоящее время планируются дополнительные исследования описанной технологии с участием Института медико-биологических проблем РАН [9, 10]. В рамках исследования будут проведены испытания технологии перспективного преобразования при работе операторов с системами телеметрии и камерами в рамках космических задач, изучено влияние отображения пространства на усталость оператора, измерено время реакции на события, передаваемые камерой.

Также проводится отработка технологий сегментации изображений в целях дальнейшего внедрения технологий распознавания объектов на преобразованном изображении.

Заключение

Рассмотрены возможности применения технологии преобразования перспективы изображения в телеметрических системах робототехнических комплексов. Исследованы матрицы преобразования изображений в рамках решения прикладных задач. Разработан прототип программного средства, демонстрирующий особенности работы видеокамеры с внесением целевых искажений перспективы. Проведены испытания прототипа программного средства внесения искажений для исследования возможности преобразования изображения на дальних и ближних планах, а также преобразования

изображения, полученного с поверхности Земли. По итогам исследования будут предложены способы внедрения разрабатываемых методов в системы управления робототехнических комплексов и средств видеонаблюдения.

Список литературы

1. **Stoianovici D.** et al. Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 65, N.1. P. 165—177. Doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. **Ermolov I.** A novel data fusion architecture for unmanned vehicles // 21TH International Symposium On Measurement And Control In Robotics ISMCR'2018. 26—28 September 2018. Vol. 3.
3. **Ковалев А. М.** О визуальном воспринимаемом пространстве предметов // *Автометрия*. 2003. Т. 39, № 6. С. 3—12.
4. **Раушенбах Б. В.** Геометрия картины и зрительное восприятие. СПб.: Азбука-классика, 2002. 320 с.
5. **Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Strohband S., Dupont C., Jendrossek L. E., Koelen C., Markey C., Rummel C., Niekerk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kaehler A., Nefian A., Mahoney P.** Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge // *The 2005 DARPA Grand Challenge*. 2007. Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 36. P. 1. doi:10.1007/978-3-540-73429-1_1.
6. **Garcia G., Soares O., Aranda G., Tersero S., Graso O., Enano N.** Learning Image Processing with OpenCV. USA, Publisher Packt, 2015. 232 p.
7. **Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л.** Разработка концепции системы телеметрии РТК с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2021. Т. 9, № 1. С. 26—31.
8. **Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Крикалев С. К., Кумакшев С. А., Секерж-Зенькович С. Я.** Идентификация системы океанских волн по фотоснимкам из космоса // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2009. № 1. С. 117—127.
9. **Беляев М. Ю., Виноградов П. В., Десинов Л. В., Кумакшев С. А., Секерж-Зенькович С. Я.** Идентификация по фотоснимкам из космоса источника океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2011. № 1. С. 70—83.
10. **Алиев Р. Н., Ермолов И. Л.** Преобразование изображения с камеры мобильного робота к системе перцептивной перспективы // *Тр. конф. "Робототехника и мехатроника — 2015" в составе МКПУ-2015*. 2015. С. 60—62.
11. **URL:** <https://russianblogs.com/article/5658585388/> (дата обращения: 18.07.2021)
12. **URL:** <https://ip76.ru/perspective-transformation/> (дата обращения: 18.08.2020).
13. **Рожкова Г. И., Алексеенко С. В.** Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на различные механизмы зрительной системы // *Мир техники кино*. 2011. Т. 5, № 3 (21). С. 12—21.
14. **Oliva A., Torralba A.** Scene-Centered Description from Spatial Envelope Properties // *Proc. 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision (BMCV'02)*, Tubingen, Germany. 2002.
15. **Oliva A., Torralba A.** Modeling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope // *International Journal of Computer Vision*. 2001. Vol. 42, N. 3. P. 145—175.
16. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15910—2002.** Информационная технология. Процесс создания документации пользователя программного средства. ВНИИСтандарт.

A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry

F. M. Belchenko, philepp@mail.ru, I. L. Ermolov, ermolov@ipmnet.ru,
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: **Belchenko Fillip M.**, Programming Engineer,
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: philepp@mail.ru

Accepted on September 01, 2021

Abstract

Remotely controlled robots are the majority of contemporary robots' population. As a rule such robots are used for inspection, patrolling, mines disposal. This is caused by a fact that today's level of robots' autonomy is rather low and autonomous robots can not secure reliable performance. However performance of remotely operated robots depends largely on efficiency of information perception by human-operator. This paper studies images representation to operators on robots' control pendants. More specifically it studies 3D images representation on flat displays. The goal of this study is to increase reaction rate and decrease errors done by robot's operator due to image's uncertainty or poor quality. Our main attention is paid to the development of software that implements the technology of transforming the perspective of images. Matrixes for perspective transformation are studied. Hence application of these matrixes within remotely operated robots is discussed. A novelty of this research is in new knowledge about perspective transformation which is done for a better information perception by human-operator and, as an outcome, to increase efficiency of remotely operated robots. The related technologies in the field of telemetry and technical vision systems have been investigated. Also considered are works in medical fields, in particular, the psychology of perception of images and space. A static software model has been developed. The video camera has been implemented with the introduction of perspective distortions to improve the reliability of the transmission of the necessary areas in the image. Research on the technology is carried out jointly with the Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences. A special prototype for perspective transformation basing on various scenarios is being developed.

Keywords: telemetry, robotic systems, perception transformation, machine vision

Acknowledgements: This work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation within the framework of the Russian State Assignment under contract No. AAAA-A20-120011690138-6.

For citation:

Belchenko F. M., Ermolov I. L. A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol.22, no. 12, pp. 644—649.

DOI: 10.17587/mau.22.644-649

References

1. **Stoianovici D.** et al. Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018, vol. 65, no.1, pp. 165—177, Doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. **Ermolov I.** Hierarchical data fusion architecture for autonomous systems, *ACTA IMEKO*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 28—32.
3. **Kovalev A. M.** About visually perceived space of objects, *Avtometrija*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 3—12 (in Russian).
4. **Rauschenbach B. V.** Picture's geometry and visual perception, S.-Petersburg, Azbuka-klassika, 2002 (in Russian).
5. **Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Stroband S., Dupont C., Jendrossek L. E., Koelen C., Markey C., Rummel C., Niekirk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kaehler A., Nefian A., Mahoney P.** Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge, *The 2005 DARPA Grand Challenge. Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, vol. 36, p. 1, DOI: 10.1007/978-3-540-73429-1_1.
6. **Garsia G., Soares O., Aranda G., Tersero S., Grasoia O., Enano N.** Learning Image Processing with OpenCV, Publisher Packt, USA, 2015, 232 p.
7. **Belchenko F. M., Ermolov I. L.** Concept development of telemetry system for robotic systems with the ability to introduce targeted distortions of displayed space, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2021, vol. 9, no. 1 (in Russian).
8. **Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Krikalev S. K., Kumakshv S. A., Sekerzh-Zen'kovich S. Ya.** Identification of a system of oceanic waves based on space imagery, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 1.
9. **Belyaev M. Y., Vinogradov P. V., Desinov L. V., Kumakshv S. A., Sekerzh-Zen'kovich S. Y.** Identification of a source of oceanic ring waves near Darwin's Island based on space photos, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 70—83 (in Russian).
10. **Aliev R. N., Ermolov I. L.** Transformation of camera image via perceptive perspective, *Proc. of "Robotics and Mechatronics — 2015" Conference*, Gelendzhik, 2015. pp. 60—62 (in Russian).
11. **Available at:** <https://russianblogs.com/article/5658585388/> (data: 18.07.2021).
12. **Available at:** <https://ip76.ru/perspective-transformation/> (data: 18.08.2020).
13. **Rozhkova G. I., Alekseenko S. V.** Visual discomfort in the perception of stereoscopic images as a result of the unusual distribution of the load on various mechanisms of the visual system, *The world of cinema technology*, 2011, vol. 5, no. 3 (21), pp. 12—21 (in Russian).
14. **Oliva A., Torralba A.** Scene-Centered Description from Spatial Envelope Properties, *Proc. 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision (BMCV'02)*, Tübingen, Germany, 2002.
15. **Oliva A., Torralba A.** Modeling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope, *International Journal of Computer Vision*, 2001, vol. 42(3), pp. 145—175.
16. **GOST R ISO/IEC 15910—2002.** Information technology. Software user documentation process (in Russian).