
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.932.72'1
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1066-1072

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ СТЕРЕОЗРЕНИЯ

А. А. АЗБЕКЯН, А. А. ПЫРКИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: pyrkin@itmo.ru*

Представлен алгоритм оценивания положения и ориентации объекта на сцене при помощи системы стереозрения, что крайне актуально в современном робототехническом производстве при построении систем управления с элементами искусственного интеллекта. Особенностью предложенного решения является анализ трехмерной геометрии объектов по информации, полученной из двумерных изображений. Разработанный алгоритм может быть применен в задачах неразрушающего контроля трубопроводов с помощью роботизированных дефектоскопов, оснащенных видеокамерами. Подобные роботизированные дефектоскопы используют различные методы диагностирования: Использование разработанного алгоритма стереозрения может обеспечивать сплошной контроль поверхности трубопровода (покрытие 100 %), а также автономное маневрирование и прохождение элементов трубопроводной обвязки.

Ключевые слова: *стереозрение, стереоскопия, облако точек, компьютерное зрение, оценка положения*

Введение. При современном уровне развития робототехники участие человека в производстве носит лишь вспомогательный характер. Ему отводятся задачи, связанные, например, с диагностикой сетей или обеспечением безопасности. Все такие предприятия по праву считаются автоматизированными, поскольку на конвейерах осуществляется как высокоточная сборка, так и транспортировка.

Однако в последние годы появился запрос на гибкость производства: робототехнические фабрики осуществляют сборку лишь ограниченного класса продуктов. Ограничение обусловлено необходимостью постоянно менять технику и перестраивать конвейер с изменением комплектующих. К примеру, крупный автоконцерн на одной из своих фабрик производит автомобили определенной модели. Обновление линейки повлечет изменение как технического оснащения, так и всего технологического процесса сборки (может даже привести к необходимости строить отдельную фабрику под новый тип продукта).

Решение, с технической точки зрения, кроется в замене устаревшего конвейера на систему гибких робототехнических ячеек. В связи с этим остро встает вопрос об их технологической поддержке интеллектуальными системами с обратной связью в виде сенсоров. Чем больше сенсоров размещено вокруг сцены, тем более полное представление о ней может быть получено. Одно из решений — использование стереокамеры. С ее помощью возможно по двумерным данным (левое и правое изображение) анализировать сцену в трехмерном пространстве.

Обзор литературы. С развитием машинного обучения и, в частности глубоких нейронных сетей, использование последних стало ключевым решением задачи оценки положения, независимо от выбранного сенсора [1—5]. Методы решения задачи можно классифицировать по типу соответствия данных.

В первом случае решается так называемая задача Perspective-n-point, суть которой состоит в том, чтобы восстановить положение объекта по соответствию трехмерных ключевых точек, заданных в системе координат (СК) объекта, и их проекций на изображении. Авторы статьи [6] используют глубокие нейронные сети для того, чтобы определить координаты выбранных в трехмерном пространстве ключевых точек на двумерном изображении, а затем с помощью алгоритма RANSAC восстанавливают положение объекта в мировой СК. Рассматриваемый в работе [7] подход строится на соответствии нескольких наборов ключевых признаков на изображении (2D—2D). Авторы извлекают признаки (углы, отрезки и т.п.) из изображения, а затем путем генерации синтетических изображений из модели объекта с известной геометрией пытаются оценить его положение.

Отдельно стоит отметить так называемые Single-stage-алгоритмы, в которых глубокая нейронная сеть обучается предсказывать положение по одному кадру без вспомогательной информации. В статье [8] авторы расширили популярный алгоритм SSD, изначально использовавшийся для двумерного случая, на оценку трехмерного преобразования.

Постановка задачи. Рассматривается робототехническая система в некоторой окружающей среде. Среду ограничивает участок пространства, в котором робототехническая система (здесь и далее „робот“) может осуществлять взаимодействие с различными статическими и динамическими объектами, включая других роботов. Совокупность пространства, объектов и роботов в литературе называется сценой. Пример сцены представлен на рис. 1. Робот-манипулятор оперирует в пространстве, ограниченном белым столом; помимо него на сцене стоит камера, установленная на штатив, а также разбросаны детали для захвата.



Рис. 1

Роботу (в данном примере — манипулятору) для точного позиционирования и захвата необходимо точно знать положение и ориентацию детали на сцене, за что и отвечает стереокамера. Оценка производится относительно камеры, а потому необходимо ввести единую, неподвижную систему координат, которую в литературе чаще всего называют „мировой“, обозначают буквой w и располагают в базе манипулятора.

Введем целевую функцию ошибки, описывающую расположение инструмента относительно объекта (слева от точки с запятой в скобках находятся изменяемые во времени величины — *аргументы*, справа — не изменяемые *параметры*):

$$E(T_w^e, T_w^S, T_{\text{des_rel}}) = T_w^e T_{\text{des_rel}} - T_w^S, \quad (1)$$

где T_w^S и T_w^e — преобразование из мировой системы координат в систему координат объекта и рабочего органа соответственно, $T_{\text{des_rel}}$ — некоторое относительное преобразование из СК рабочего органа в СК объекта, по достижении которого ошибка должна свестись к нулю.

Положение рабочего органа в системе координат базы определяется кинематической моделью робота и конфигурацией углов осей, соединяющих его звенья, поэтому необходимо оценить позу статического объекта на сцене T_w^S с помощью системы стереозрения:

$$\hat{T}_w^S = \hat{T}_w^c \hat{T}_c^S. \quad (2)$$

Величина \hat{T}_w^c в уравнении (2) характеризует преобразование из СК базы робота в СК камеры, а \hat{T}_c^S — положение объекта в СК камеры. За оценку положения камеры в абсолютной системе координат отвечает процедура калибровки ячейки (зачастую для точной оценки местоположения используются маркеры — легко детектируемые объекты, различаемые по черно-белому паттерну на поверхности).

Основной результат. В настоящей работе предлагается алгоритм оценки положения объекта в системе координат камеры с помощью системы стереозрения. Его суть сводится к сопоставлению двух облаков точек (3D—3D-соответствие): полученных с камеры и сгенерированных из известной 3D-модели объекта.

Процедура включает следующие этапы:

- 1) получение карты глубины из кадров левого и правого каналов камеры;
- 2) преобразование карты глубины в облако точек;
- 3) составление облаков точек и оценка трансформации между ними.

Рассмотрим принцип работы стереокамеры. Центральным определением в стереозрении является так называемое „смещение” (*disparity*) — величина отклонения проекции точки на левом и правом изображениях вдоль одной оси (рис. 2).

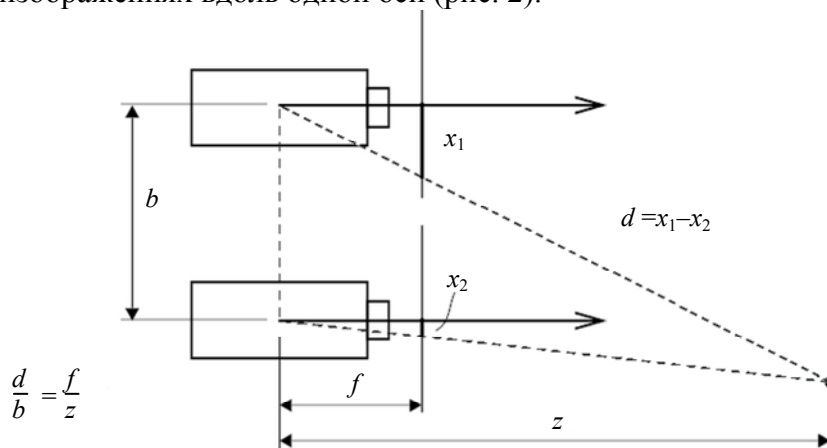


Рис. 2

В классическом случае, когда центры камер с фокусным расстоянием f в системе стереозрения со смещением d пикселей расположены на одной прямой на расстоянии b , возможно рассчитать компонент глубины для каждого из пикселей по формуле:

$$Z = \frac{fb}{d}, \quad (3)$$

и, как следствие, получить карту глубины (плоское изображение, содержащее информацию о расстоянии до поверхностей объектов на сцене). На рис. 3 представлены изображение с одного из каналов стереокамеры (вверху) и соответствующая ему карта глубины (внизу).



Рис. 3

Для перехода от данного представления к облаку точек рассчитаем оставшиеся 3D-координаты:

$$X = (x_l - c_x) \frac{Z}{f}, \quad Y = (y_l - c_y) \frac{Z}{f}, \quad (4)$$

где $\{x, y\}_{l,r}$ — координаты точки на левом или правом изображении, (c_x, c_y) — координаты центра камеры в системе координат изображения.

Для расчета окончательного преобразования необходимо произвести регистрацию облаков точек — это процесс определения такой трансформации T^* группы SE(3) (специальная евклидова группа), что:

$$T^* = \arg \min dist(T(M), S), \quad T \in \mathbf{T}, \quad (5)$$

где $\{M, S\}$ — это облака точек в \mathbb{R}^3 пространстве, \mathbf{T} — это множество всех возможных трансформаций.

Наиболее популярным решением является итеративный алгоритм ближайших точек, имеющий следующие шаги:

- 1) для точки $s_i \in S$ по принципу „ближайшего соседа“ найти соответствующую точку m_i во множестве M ;
- 2) оценить новую матрицу трансформации T , минимизирующую среднеквадратическую ошибку, которая выражает расстояние между соответствующими точками, и применить ее к множеству M ;
- 3) повторять шаги 1—2 для каждой точки из множества S ;
- 4) повторять весь цикл 3 до тех пор, пока максимальная ошибка по расстоянию между точками не будет ниже порогового значения.

Результат работы алгоритма регистрации облаков точек представлен на рис. 4 (видно, что до регистрации двух облаков точек расстояние между соответствующими точками велико — слева, а после оно минимально — справа).

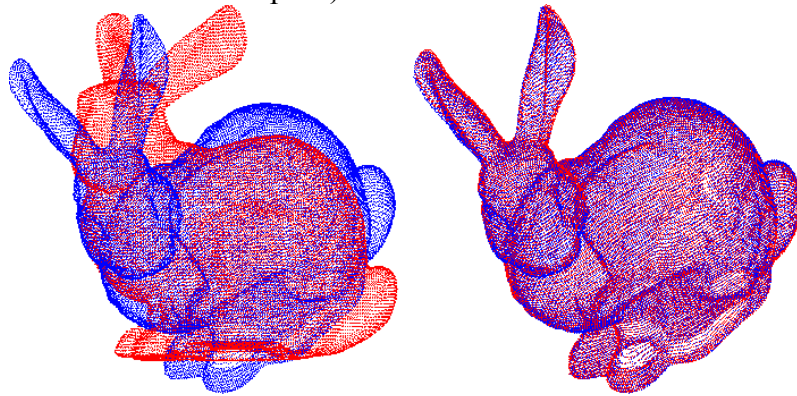


Рис. 4

Заключение. В статье представлен алгоритм оценивания положения и ориентации объекта на сцене при помощи системы стереозрения, что крайне актуально в современном робототехническом производстве при построении систем управления с элементами искусственного интеллекта. Разработанный *алгоритм стереозрения* может быть применен в задачах неразрушающего контроля трубопроводов с помощью роботизированных дефектоскопов, оснащенных видеокамерами. Подобные роботизированные дефектоскопы используют различные методы диагностирования: акустические, электромагнитные, молекулярные, радиационные и др. В частности, в работах [9, 10] применен датчик, выполненный по технологии фазированных антенных решеток с электромагнитно-акустическими преобразователями. В состав предложенного в [10] роботизированного дефектоскопа входят обзорная и ходовые камеры с осветителями. Использование разработанного *алгоритма стереозрения* может обеспечивать возможность проведения сплошного контроля исследуемой поверхности трубопровода (покрытие 100 %), а также автономного маневрирования и прохождения элементов трубопроводной обвязки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 074-11-2018-029 от 13 июля 2018 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang C. et al. Densefusion: 6d object pose estimation by iterative dense fusion // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 3343—3352.
2. Michel F. et al. Global hypothesis generation for 6D object pose estimation // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 462—471.
3. Tekin B., Sinha S. N., Fua P. Real-time seamless single shot 6d object pose prediction // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 292—301.
4. Hu Y. et al. Segmentation-driven 6d object pose estimation // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 3385—3394.
5. Hu Y. et al. Single-Stage 6D Object Pose Estimation // Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020. P. 2930—2939.
6. Oberweger M., Rad M., Lepetit V. Making deep heatmaps robust to partial occlusions for 3d object pose estimation // Proc. of the Europ. Conf. on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 119—134.
7. Kundu J. N., Rahul M. V., Ganeshan A., Babu R. V. Object Pose Estimation from Monocular Image Using Multi-view Keypoint Correspondence // Computer Vision — ECCV 2018 Workshops. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2019. Vol. 11131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11015-4_23.

8. Kehl W. et al. Ssd-6d: Making RGB-based 3d detection and 6d pose estimation great again // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Vision. 2017. P. 1521—1529.
9. Базылев Д. Н., Романович В. А., Ведыков А. А. Автоматизированный метод внутритрубного ультразвукового контроля с использованием фазированной антенной решетки // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 167—172.
10. Сомов С. Н., Баранов Г. В., Поляшов М. А., Пыркин А. А. Роботизированный дефектоскоп для диагностики состояния трубопроводов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 157—166.

Сведения об авторах

- Арам Артурович Азбекян** — аспирант; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: nindz9@gmail.com
- Антон Александрович Пыркин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: pyrkin@itmo.ru

Поступила в редакцию
18.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Азбекян А. А., Пыркин А. А. Алгоритм оценки положения объекта с помощью системы стереозрения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1066—1072.

AN ALGORITHM FOR ASSESSING AN OBJECT POSITION USING STEREO VISION SYSTEM**A. A. Azbekian, A. A. Pyrkin**

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: pyrkin@itmo.ru

An algorithm for estimating the position and orientation of an object on the stage using a stereo vision system is presented. The algorithm is reported to be extremely important in modern robotic production when building control systems with elements of artificial intelligence. A feature of the proposed solution is the analysis of three-dimensional geometry of objects based on information obtained from two-dimensional images. The developed algorithm can be applied in the problems of non-destructive testing of pipelines using robotic flaw detectors equipped with video cameras. Such robotic flaw detectors use various diagnostic methods; application of the developed stereo vision algorithm can provide continuous control of the pipeline surface (100 % coverage), as well as autonomous maneuvering and passage of pipeline elements.

Keywords: stereo vision, stereoscopy, point clouds, computer vision, position estimation.

REFERENCES

1. Wang C. et al. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 3343–3352.
2. Michel F. et al. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 462–471.
3. Tekin B., Sinha S. N., Fua P. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 292–301.
4. Hu Y. et al. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 3385–3394.
5. Hu Y. et al. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 2930–2939.
6. Oberweger M., Rad M., Lepetit V. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018, pp. 119–134.
7. Kundu J.N., Rahul M.V., Ganeshan A., Babu R.V. *Computer Vision – ECCV 2018 Workshops. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2019, vol. 11131, https://doi.org/10.1007/978-3-030-11015-4_23.
8. Kehl W. et al. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017, pp. 1521–1529.
9. Bazylev D.N., Romanovich V.A., Vedyakov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 9 (62), pp. 167–172. (in Russ.)
10. Somov S.N., Baranov G.V., Polyashov M.A., Pyrkin A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 9(62), pp. 157–166. (in Russ.)

Data on authors**Aram A. Azbekian**

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: nindz9@gmail.com

Anton A. Pyrkin

— Dr. Sci., Professor; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: pyrkin@itmo.ru

For citation: Azbekian A. A., Pyrkin A. A. An algorithm for assessing an object position using stereo vision system. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1066—1072 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1066-1072