**Иван Юрьевич
Холодиллин
Ivan Yu. Kholodilin**

*аспирант,
Южно-Уральский
государственный
университет
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*

**Дмитрий Юрьевич
Хрюкин
Dmitry Yu. Khriukin**

*аспирант,
Южно-Уральский
государственный
университет,
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*

**Максим Анатольевич
Григорьев
Maksim A. Grigorev**

*доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
«Автоматизированный
электропривод»,
Южно-Уральский
государственный
университет
(Национальный
исследовательский
университет),
Челябинск, Россия*

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-100-109

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПОЛУЦИЛИНДРОВ ТРУБЫ СТАНА 1020

Актуальность

В настоящее время особенно актуально усовершенствование производственного оборудования. От степени модернизации производственных мощностей зависят затраты времени на производство единицы продукции, время полезной работы станков, рентабельность использования оборудования, и, самое важное, качество производимой продукции. В условиях нормальной рыночной конкуренции на рынке металлургической продукции качество выпускаемой продукции является ключевым фактором успеха предприятия в борьбе за потребителя, в расширении завоеванных рынков. Отсутствие определенных характеристик, удовлетворяющих, по мнению потребителей, определенным параметрам качества, как правило, становится причиной потери существующих покупателей и отсутствия возможностей завоевания новых. Доля существующих измерительных систем установок контроля геометрии полуцилиндров трубы стана имеют ряд недостатков: низкие энергетические показатели установки; длительное время выполнения технологического процесса; сложность и неоднозначность функционирования алгоритмов контроля геометрии полуцилиндра.

Цель исследования

Обеспечение высоких энергетических показателей и быстродействия системы контроля геометрии полуцилиндров трубы Стана 1020, что реализуется за счет корректной интерпретации информации, получаемой от датчиков в метрическую информацию о геометрии полуцилиндра.

Методы исследования

Для сравнения модернизированной измерительной системы с существующей разрабатываемые методы тестируются в виртуальной среде (программы Unity и Matlab), повторяющей реальный технологический процесс. В реальных экспериментах существует неопределенность измерений, что усложняет сравнение методов между собой. Кроме того, в реальных условиях трудно или невозможно оценить значения определенных параметров: местоположение, ориентацию лазерной плоскости или значение радиуса полуцилиндра, тогда как в среде моделирования они известны. Виртуальная среда, в свою очередь, позволяет устранить данные проблемы.

Результаты

Разработана и изготовлена система технического зрения, позволяющая достичь высоких энергетических показателей и быстродействие системы. Данная измерительная система содержит меньшее количество электрических элементов и механических соединений по сравнению с исходной измерительной системой, что, в свою очередь, увеличивает надежность системы. Более того, посредством предложенного решения сечение полуцилиндра может регистрироваться непрерывно, не требуется останов тележки, а, следовательно, повышаются энергетические показатели установки за счет уменьшения времени выполнения технологического процесса. Также рассмотрен вопрос важности калибровки измерительной системы. Калибровка системы позволила произвести измерение сечения полуцилиндра в допустимых в соответствии с техническим заданием пределах. С помощью разработанной имитационной виртуальной среды удалось добиться улучшенных метрологических характеристик.

Ключевые слова: всенаправленная камера, структурированный свет, семантические данные, unity, среда программирования

MILL 1020 TUBE HALF-CYLINDER GEOMETRY CONTROL SYSTEM

Relevance

Currently, the improvement of production equipment is especially important. The degree of modernization of production facilities determines the time spent on the production of a unit of production, the time of the useful work of the mills, the profitability of the use of equipment, and most importantly, the quality of the products. In the conditions of normal market competition in the market of metallurgical products, the quality of products is a key factor in the success of the enterprise in the struggle for the consumer, in the expansion of the conquered markets. The lack of certain characteristics that satisfy, in the opinion of consumers, certain quality parameters, as a rule, becomes the reason for the loss of existing customers and the lack of opportunities to conquer new ones. The share of existing measuring systems of installations for controlling the geometry of the half-cylinders of the mill pipe have a number of disadvantages: low energy indicators of the installation; long lead time of the technological process; the complexity and ambiguity of the functioning of the algorithms for controlling the geometry of the half-cylinder.

Aim of research

To investigate and optimize the technical implementation of the system in order to ensure high energy performance and speed of the system. As well as investigate and ensure the correct interpretation of the information received from the sensors into metric information about the geometry of the half-cylinder.

Research methods

In order to compare the modernized measuring system with the existing one, the proposed theories and methods are tested on the basis of the developed virtual environment (unity and Matlab programs), which recreates the real technological process. In real experiments, there is measurement uncertainty, which complicates the comparison of methods with each

other. In addition, in real conditions it is difficult or impossible to estimate the values of certain parameters: location, orientation of the laser plane or the value of the radius of a half-cylinder, whereas in the simulation environment they are known. The virtual environment, in turn, eliminates these problems.

Results

An original technical vision system has been developed and manufactured, which allows to achieve high energy indicators and system performance. This measuring system contains fewer electrical components and mechanical connections than a standard measuring system, which in turn increases the reliability of the system. Moreover, by means of the proposed system, the cross-section of the half-cylinder can be scanned continuously, there is no need to stop the measurement equipment, and therefore, the energy parameters of the system increase and the time of the technological process decreases. The issue of the importance of calibrating the measuring system was also raised, which was not touched upon earlier. Calibration of the system made it possible to measure the cross-section of the half-cylinder within the permissible limits, in accordance with the terms of reference. With the help of the developed simulation virtual environment, it was possible to achieve the above results.

Keywords: omnidirectional camera, structured light, semantic data, unity, matlab

Введение

Типовая установка для контроля геометрии полуцилиндров имеет следующий принцип работы: после подачи рольгангом полуцилиндра включается двигатель датчика, осуществляется перемещение датчика с установившейся скоростью. По окончании снятия сечения двигатель датчика останавливается, происходит запуск двигателя тележки, осуществляется перемещение тележки с установившейся рабочей скоростью. Переместившись на заданную длину, двигатель повторно останавливается. Затем регистрируется следующее сечение. Так происходит фиксация шести сечений, после чего включается двигатель для движения в обратную сторону, тележка возвращается в исходное положение. Затем происходит подача следующего полуцилиндра. Однако данная установка имеет ряд недостатков, ниже обозначены основные из них:

— *завышенное время измерения.* Перед снятием сечения полуцилиндра необходима полная остановка тележки. После чего для снятия сечения полуцилиндра необходимо осуществлять и контролировать вращение датчика в пределах измеряемого сечения. Частые пуско-тормозные режимы двигателя тележки и электропривода вращения датчика ведут к повышенному потреблению электроэнергии, а

также данные процессы увеличивают время, затрачиваемое на снятие сечения полуцилиндра. Уменьшить расход электроэнергии можно путем непрерывного движения тележки, что станет возможным за счет уменьшения времени обработки данных измерительного датчика;

— *усложненная конфигурация системы.* Текущая конфигурация элементов, предназначенных для регистрации данных сечения полуцилиндра, содержит: датчик расстояния, двигатель датчика, редуктор, датчик положения, а также усложненную механику. В свою очередь, избыточное количество элементов снижает надежность системы, усложняет режимы программирования системы, увеличивает энергопотребление и повышает требования к техническому обслуживанию эксплуатируемого объекта;

— *невысокие метрологические характеристики.* Текущая система регистрации сечения полуцилиндра содержит механические узлы, за счет чего положение установленного измерительного датчика будет иметь отклонение от требуемого. Следовательно, расчетное и реальное сечения будут отличаться, и, в свою очередь, измерения будут неверны. Для проведения достоверных измерений необходимо определить реальное отклонение датчика.

Данное отклонение может быть получено посредством калибровки системы. В исходной схеме такая задача не решалась.

С учетом сказанного, актуальными являются научно-технические задачи: обеспечение высоких энергетических показателей, быстродействия, а также повышение надежности системы контроля геометрии полуцилиндров за пресом окончательной формовки трубы стана. Процесс модернизации также мотивирован широким использованием системы технического зрения, построенной на базе камеры с широким углом обзора и источником структурированного света [1–3]. Использование данной камеры дает широкий угол обзора, следовательно, больше информации извлекается из окружающей среды, что является преимуществом по сравнению со стандартными камерами [4–6]. Основным преимуществом использования структурированного света для анализа данных является его простой механизм обнаружения и извлечения из исходного изображения [7, 8].

Таким образом, данная система технического зрения получила широкое внимание в научных кругах благодаря своему широкому углу обзора и высокой эффективности измерений [9, 10]. В данной статье также рассматриваются калибровка системы и дальнейшая оценка качества калибровочных параметров посредством измерения геометрии полуцилиндра. Отличительной особенностью данных методов является то, что за счет одного изображения становится возможным произвести калибровку системы и измерение сечения полуцилиндра.

2. Описание предлагаемой измерительной системы и ее преимущества

2.1 Описание предлагаемой измерительной системы

В ходе анализа технологического процесса, а также недостатков типовых уста-

новок контроля геометрии полуцилиндров выявлено, что измерительная система требует существенной модернизации.

Измерительная часть представляет собой систему технического зрения, включающую в свой состав камеру с широким углом обзора, а также лазерный излучатель (структурированный свет). Предлагаемая конфигурация позволила сократить количество электрических и механических элементов по сравнению с исходной системой (рисунок 1).

1 — тележка; 2 — полуцилиндр;
3 — двигатель датчика/система
технического зрения; 4 — редуктор;
5 — датчик положения;
6 — измерительный датчик

1 — cart; 2 — half-cylinder; 3 — motor
of the sensor/vision system; 4 — reducer;
5 — encoder; 6 — measuring sensor

Рисунок 1. Кинематическая схема типовой и предлагаемой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 1. Kinematic diagram of a typical and proposed installation for controlling the geometry of half-cylinders

2.2 Модель системы

Для тестирования предлагаемой системы и демонстрации ее возможностей при помощи программной среды Unity разработана виртуальная экспериментальная среда, ориентированная на осуществление контроля геометрии полуцилиндров (рисунок 2).

Разработанный симулятор также поддерживает коммуникационный интерфейс, который может быть использован при работе со сторонними программами, поддерживающими ТСР. Более того, фотореализм современных игровых платформ открывает новые возможности в разработке и оценке методов решения разнообразных задач, устраняя разрыв между виртуальной и реальной средой. Также следует отметить то, что разрабатываемые симуляторы приближаются не только к фотореализму, но и к реалистичному физическому моделированию, которое поддерживается в Unity, тем самым сокращается разрыв между моделируе-

мыми приложениями и реальными миром.

В данной статье рассматривается модель системы компьютерного зрения, включающая в свой состав камеру с широким углом обзора и источник структурированного света. Модель камеры была ранее описана в работе [11].

Принимая во внимание данную информацию, уравнение проекции лазерной плоскости можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix} \times [r_1^c \ r_2^c \ r_3^c][r_1^l \ r_2^l \ r_3^l \ t^l] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

где u, v — координаты пикселей изображения; r_1^c, r_2^c, r_3^c — векторы матрицы поворота камеры; параметры r_1^l, r_2^l, r_3^l, t^l представляют матрицу перехода лазерной плоскости. Полином $f(\rho)$ может быть расписан как:

a) виртуальная модель установки контроля геометрии полуцилиндров; б) снимок камеры

a) virtual model of the half-cylinder geometry control unit; b) snapshot of a camera

Рисунок 2. Виртуальная экспериментальная среда, ориентированная на осуществление контроля геометрии полуцилиндров

Figure 2. Virtual experimental environment focused on the control of the half-cylinder geometry

$$f(\rho) = a_0 + a_2\rho^2 + \dots + a_N\rho^N, \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}, \quad (3)$$

где a_i — коэффициенты;

N — степень полинома;

u_c, v_c — координаты центра изображения.

Лазерная плоскость расположена на фиксированном расстоянии от оптического центра камеры: вдоль оси Z (рисунок 2). Данное расстояние соответствует 3-й строке вектора t^l , следовательно, глобальные координаты вдоль оси Z не изменяются. Таким образом, в уравнении (1) $Z = 0$, и это уравнение можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ f(\rho) \end{bmatrix} \times [r_1^c \ r_2^c \ r_3^c][r_1^l \ r_2^l \ t^l] \begin{bmatrix} Y \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (4)$$

2.3 Анализ работы системы

В данном разделе приводится описание того, как решаются проблемы исход-

ной системы измерения за счет применения новых подходов.

Оптимизация по критерию времени технологического процесса. Предлагаемая система технического зрения способна функционировать и передавать изображения в реальном времени и не требует останова двигателя тележки для снятия сечения полуцилиндра, за счет чего уменьшается время технологического процесса, а также снижаются потери в электроприводе.

На рисунке 3 показана нагрузочная диаграмма описанного технологического процесса.

По сравнению с диаграммой, представленной на рисунке 4, видно, что становится возможным сократить время выполнения технологического процесса посредством предлагаемой измерительной системы.

Упрощение конфигурации измерительной системы. Предлагаемая измерительная система, построенная на базе техни-

Рисунок 3. Нагрузочные диаграммы скорости и момента предлагаемой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 3. Load diagrams of speed and moment of the proposed system for controlling the geometry of half-cylinders

Рисунок 4. Нагрузочные диаграммы скорости и момента типовой установки контроля геометрии полуцилиндров

Figure 4. Load diagrams of speed and torque of a typical system for controlling the geometry of half-cylinders

ческого зрения, содержит меньшее количество электрических элементов с упрощенной механикой, за счет чего увеличивается надежность системы и снижается энергопотребление. Упрощенная механика позволяет существенно снизить объем технического обслуживания измерительной системы в процессе эксплуатации.

Калибровка системы. Ранее обращалось внимание на необходимость выполнения калибровки измерительной системы, что позволит существенно повысить достоверность получаемых результатов, поэтому в разрабатываемой системе добавляется калибровочная мишень и предусматривается алгоритм калибровки датчиков.

2.4 Синтез методики измерения сечения полуцилиндра

В данном подразделе для предлагаемой системы технического зрения описывается алгоритм измерения сечения полуцилиндра, схема которого изображена на рисунке 5. Методика измерений содержит несколько этапов.

1. *Подготовка изображения.* На первом этапе необходимо сделать снимок сцены, содержащей полуцилиндр и лазерный луч:

2. *Обнаружение лазера на изображении.* Далее осуществляется сегментация лазерного луча с применением морфологической операции, такой как скелетонизация.

3. *Проекция точек лазера.* После того, как лазерный луч был извлечен, данные точки проецируются в глобальные координаты по системе уравнений (4).

4. *Определение радиуса полуцилиндра.* На последнем этапе осуществляется вписание окружности в облако точек, после чего определяется радиус полуцилиндра.

5. *Контроль геометрии полуцилиндра.* Отличительной особенностью предлагаемой системы является то, что она способна регистрировать данные сечения полуцилиндра по мере движения тележки в режиме реального времени, а это, в свою очередь, позволяет непрерывно выполнять контроль качества геометрии полуцилиндра.

3. Экспериментальные исследования предлагаемой системы

3.1 Описание эксперимента

Основная задача, которую решает система технического зрения, состоит в корректной интерпретации исходной информации от датчиков в метрическую информацию о геометрии полуцилиндра. Для проверки качества и метрологических характеристик интерпретации данных преобразований в ходе эксперимента проводились измерения радиуса полуцилиндра. В ходе эксперимента регистрировалось 40 различных конфигураций системы технического зрения, созданных средой моделирования. Ориентации камеры и лазерной плоскости были уста-

Рисунок 5. Алгоритм измерения сечения полуцилиндра

Figure 5. Algorithm for measuring the cross-section of a half-cylinder

новлены случайным образом в диапазоне от -10°

3.2 Обсуждение результатов

В данном разделе приводятся рассчитанные для всех конфигураций средняя абсолютная (MAE) и среднеквадратичная (RMSE) ошибки. Качество измерений оценивалось по показателю неопределенности измерений с учетом среднеквадратичного отклонения (STDEV):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

где x_i — текущее измеренное значение;

$\bar{x}$ — среднее измеренное значение;

n — индекс эксперимента.

Данные расчеты сведены в таблицу 1.

По данным таблицы 1 видно, что при увеличении диаметра трубы также возрастает MAE и RMSE. Однако рассчитанное значение среднеквадратичного отклонения (STDEV) показало приблизительно близкие значения для разных диаметров полуцилиндров.

В таблице 2 также приводится визуальный анализ для выборочных конфигураций для полуцилиндра с диаметром 1020 мм. Визуальный анализ позволил подтвердить актуальность обязательного этапа калибровки измерительной системы.

Таблица 1. Оценка результатов измерений

Table 1. Evaluation of measurement results

	Полуцилиндр ($\varnothing = 1020$ мм)	Полуцилиндр ($\varnothing = 1220$ мм)
MAE, мм	1,18	1,59
RMSE, мм	1,09	1,26
STDEV ($\bar{R} \pm \sigma$), мм	509,22 $\pm$ 0,64	608,96 $\pm$ 0,65

Таблица 2. Оценка результатов измерений

Table 2. Evaluation of measurement results

Конфигурация № 1	Конфигурация № 2	Конфигурация № 3
Измеренное значение радиуса полуцилиндра откалиброванной системы, мм		
509,71	509,44	509,27
Абсолютная ошибка, мм		
0,29	0,56	0,63
Измеренное значение радиуса полуцилиндра неоткалиброванной системы, мм		
518,32	514,82	517,98
Абсолютная ошибка, мм		
8,32	4,82	7,98
Визуальное отображение сечения полуцилиндра (оранжевая окружность — откалиброванная система; зеленая окружность — неоткалиброванная система)		

Из таблицы 2 видно, что откалиброванная система рассчитывает радиус с метрологической ошибкой, допустимой по условиям технологического процесса.

Выводы

Предлагаемая система технического зрения позволила повысить энергетические показатели системы за счет изменения принципа измерения, когда режим контроля геометрии полуцилиндра с остановкой тележки был заменен на непрерывный безостановочный режим тележки. Предложенная измерительная система отличается улучшенными показателями надежности и метрологиче-

скими показателями, что достигается за счет снижения элементов и упрощения механики.

Полученные метрологические показатели измерения разработанной системы достигаются только при условии параллельного расположения устройства измерения и контролируемой трубы. При нарушении этого условия полученные точностные показатели достигаться не будут. Рассматриваемая проблема может быть решена внедрением следящих электроприводов, регулирующих положение измеряемой трубы, что будет детально изучено и рассмотрено в последующей работе.

Список источников

1. Deng J., Chen B., Cao X., Yao B., Zhao Z., J. Yu. 3D Reconstruction of Rotating Objects Based on Line Structured-Light Scanning // Proc. of the International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC). 2018. P. 244-247.
2. Ruvo P., Ruvo G., Distanti A., Nitti M., Stella E., Marino F. An Omnidirectional Range Sensor for Environmental 3-D Reconstruction // Proc. of the 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2010. P. 396-401.
3. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera // Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. Vol. 1, No. 23. P. 1640-1644.
4. Fernandez-Labrador C., Perez-Yus A., Lopez-Nicolas C., Guerrero J. Layouts from Panoramic Images with Geometry and Deep Learning // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3, No. 4. P. 3153-3160.
5. Fernandez-Labrador C., Facil J., Perez-Yus A., Demonceaux C., Civera J., Guerrero J. Corners for Layout: End-to-End Layout Recovery from 360 Images // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5, No. 2. P. 1255-1262.
6. Shah S., Aggarwal J. Mobile Robot Navigation and Scene Modeling Using Stereo Fish-Eye Lens System // Machine Vision and Applications. 1996. Vol. 10. P. 159-173.
7. Kawasaki H., Sagawa R., Yagi Y., Furukawa R., Asada N., Sturm P. One-Shot Scanning Method Using an Uncalibrated Projector and Camera System // Proc. of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition — Workshops. 2010. P. 104-111.
8. Jia T., Wang B., Zhou Z., Meng H. Scene Depth Perception Based on Omnidirectional Structured Light // IEEE Transactions on Image Processing. 2016. Vol. 25, No. 9. P. 4369-4378.
9. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera // Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008. Vol. 1, No. 23. P. 1640-1644.
10. Orghidan R., Mouaddib E., Salvi J. Omnidirectional Depth Computation from a Single Image // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005. P. 1222-1227.
11. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structured from Motion //

Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Systems. January 5-7, 2006, St. Johns University, Manhattan, NY, USA. DOI: 10.1109/ICVS.2006.3.

12. Kholodilin I., Li Y., Wang Q. Omnidirectional Vision System with Laser Illumination in a Flexible Configuration and its Calibration by One Single Snapshot // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, No. 11. P. 9105-9118.

References

1. Deng J., Chen B., Cao X., Yao B., Zhao Z., J. Yu. 3D Reconstruction of Rotating Objects Based on Line Structured-Light Scanning. *Proc. of the International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, 2018, pp. 244-247.
2. Ruvo P., Ruvo G., Distanto A., Nitti M., Stella E., Marino F. An Omnidirectional Range Sensor for Environmental 3-D Reconstruction. *Proc. of the 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2010, pp. 396-401.
3. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera. *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, Vol. 1, No. 23, pp. 1640-1644.
4. Fernandez-Labrador C., Perez-Yus A., Lopez-Nicolas C., Guerrero J. Layouts from Panoramic Images with Geometry and Deep Learning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3, No. 4, pp. 3153-3160.
5. Fernandez-Labrador C., Facil J., Perez-Yus A., Demonceaux C., Civera J., Guerrero J. Corners for Layout: End-to-End Layout Recovery from 360 Images. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, Vol. 5, No. 2, pp. 1255-1262.
6. Shah S., Aggarwal J. Mobile Robot Navigation and Scene Modeling Using Stereo Fish-Eye Lens System. *Machine Vision and Applications*, 1996, Vol. 10, pp. 159-173.
7. Kawasaki H., Sagawa R., Yagi Y., Furukawa R., Asada N., Sturm P. One-Shot Scanning Method Using an Uncalibrated Projector and Camera System. *Proc. of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition — Workshops*, 2010, pp. 104-111.
8. Jia T., Wang B., Zhou Z., Meng H. Scene Depth Perception Based on Omnidirectional Structured Light. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, Vol. 25, No. 9, pp. 4369-4378.
9. Lian X., Liu Z., Wang X., Dou L. Reconstructing Indoor Environmental 3D Model Using Laser Range Scanners and Omnidirectional Camera. *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, Vol. 1, No. 23, pp. 1640-1644.
10. Orghidan R., Mouaddib E., Salvi J. Omnidirectional Depth Computation from a Single Image. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 1222-1227.
11. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structured from Motion. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, January 5-7, 2006, St. Johns University, Manhattan, NY, USA. DOI:10.1109/ICVS.2006.3.
12. Kholodilin I., Li Y., Wang Q. Omnidirectional Vision System with Laser Illumination in a Flexible Configuration and its Calibration by One Single Snapshot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, Vol. 69, No. 11, pp. 9105-9118.