

Панов А.Н.¹, Бодров Е.Э.², Бодрова С.И.², Михеева В.О.²¹ ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПУСТОГО СОВКА ПРИ РАСЧЕТЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В НЕМ С ПОМОЩЬЮ 3D-КАМЕР

При производстве стали в кислородном конвертере в качестве охладителя процесса используется стальной металлолом, составляющий около двадцати процентов шихты. От количества загруженного в печь металлолома зависит себестоимость и качество готовой стали. Однако насыпная плотность металлолома также является важным параметром, влияющим на технологический процесс. Поэтому насыпную плотность загружаемой в кислородный конвертер стали необходимо измерять. Масса металлолома измеряется с помощью специализированных весов для взвешивания совков. При известной массе металлолома в совке задача измерения насыпной плотности сводится к измерению объема металлолома, загруженного в совок. Очевидно, что такое измерение невозможно осуществить с помощью контактного метода. Поэтому данная задача была решена бесконтактным способом с помощью времяпролетной 3D-камеры, измеряющей расстояние до поверхности металлолома в совке. В результате экспериментального измерения в скрапном отделении кислородно-конвертерного цеха были получены изображения совков, представляющие собой матрицы расстояний по всем трем измерениям (x , y , z) для пустого совка и для совка с загруженным в него металлоломом. В качестве алгоритма вычисления объема в данной работе исследовался способ вычитания из изображения совка с металлоломом эталонного изображения пустого совка. Исследование базируется на результатах промышленного эксперимента в кислородно-конвертерном цехе ПАО «ММК». В работе описаны проблемы применения эталонного изображения пустого совка при расчете объема металлолома и предложены пути их решения. В работе рассчитаны значения объема металлолома для снятой части совка и сверены со значением, полученным ранее другим способом вычисления для того же совка. Полученное в работе значение объема металлолома отличается от рассчитанного ранее не более чем на 5%.

Ключевые слова: металлургическая промышленность, производство стали, печи, измерение объема, 3D-камера, металлолом, насыпная плотность, кислородный конвертер, бесконтактное измерение, совок для скрапа.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства стали в кислородном конвертере обладает рядом преимуществ, что обуславливает повсеместное его применение для получения стали из чугуна. С целью снижения расхода жидкого чугуна и с целью охлаждения расплава до необходимой температуры перед началом плавки в конвертер загружают металлолом с помощью специальных совков для скрапа [1]. Массовая доля металлолома в шихте составляет около 20–25% [2].

Насыпная плотность металлолома является одним из важных параметров технологии выплавки стали, так как от нее зависит технологическая стабильность конвертерного процесса и выход готовой стали [3]. Из-за того, что источники стального металлолома могут быть различными, его насыпная плотность варьируется в широком диапазоне.

Насыпную плотность металлолома можно рассчитать, получив информацию о массе загружаемого металлолома из системы АСУ ТП кислородного конвертера и разделив ее на объем металлолома в совке. Поэтому в рамках данной работы стоит задача расчета объема металлолома в совке.

Решить данную задачу с помощью контактного метода измерения не представляется возможным, поэтому нужно применить бесконтактный метод измерения, например, с помощью цифровой 3D-камеры. Существуют множество способов бесконтактного измерения геометрических размеров или объема объекта [4–16]. В данной работе для измерения объема стального металлолома в совке была использована 3D-камера ОЗМ-150 производства компании Ifm electronic [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В СОВКЕ

В условиях кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК» были проведены промышленные эксперименты по измерению объема металлолома в совке для скрапа с использованием 3D-камеры ОЗМ-150, подробно описанные в [18].

В результате экспериментов были получены три таблицы размером 64x16 значений расстояний x , y и z , измеренных камерой ОЗМ-150, как показано на **рис. 1**. Каждая таблица содержит 1024 пикселя.

Камера измеряет расстояние d до поверхности металлолома в совке. Затем внутренний алгоритм камеры автоматически пересчитывает расстояние d в величины x , y и z , т.е. переводит полярные координаты в декартовые. После этого можно считать с камеры рассчитанные ей значения x , y , z и далее использовать их для последующих вычислений объема металлолома.

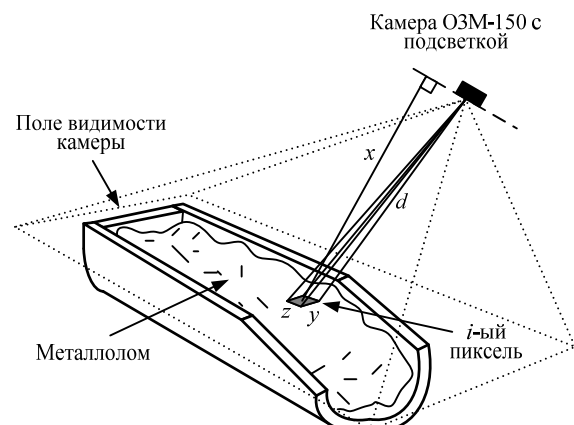


Рис. 1. Измерение камерой ОЗМ-150 совка с металлоломом

Обработать полученные данные можно различными способами [18]. В данной работе предложена методика вычисления объема металлолома в загруженном совке путем вычитания объема рассчитанного для пустого совка, используемого в качестве эталона.

Экспериментальная установка для измерения объема бесконтактным способом с помощью трехмерной камеры представлена на **рис. 2**.

Результаты измерений расстояния x_i , прочитанные с камеры, с целью упрощения дальнейших расчетов объема были подвергнуты математической обработке, заключающейся в пересчете значений расстояния, выдаваемых камерой в значения высоты от горизонтальной плоскости, в которой расположена камера, до металлолома в совке (см. **рис. 2**).

Расчет искомого расстояния a_i производился по следующей зависимости [18]:

$$a_i = \frac{x_i \cdot \cos(\beta + \alpha_i)}{\cos \alpha_i}, \quad (1)$$

где α_i – угол расположения i -го пикселя относительно центрального; β – угол наклона камеры к горизонту.

Угол α_i равен нулю на оси центрального пикселя и изменяется от 0 до $+35^\circ$ в положительную сторону от центральной оси (к дальнему краю совка) и от 0 до -35° в отрицательную сторону от центральной оси (к ближнему краю совка). Значение $\pm 35^\circ$ получено делением угла обзора камеры в вертикальном направлении, составляющего 70° , пополам.

Графики полученных значений a_i для пустого и полного совков приведены на **рис. 3** и **4** соответственно. Высота, на которой находилась камера над дном совка, составляла 6 м. Такой высоты недостаточно для того, чтобы захватить в поле видимости камеры ОЗМ-150 весь совок с металлоломом. Однако условия проведения эксперимента не позволили расположить камеру на большей высоте. Поэтому изображения, приведенные на **рис. 3** и **4**, соответствуют передней части совка с металлоломом. Зная соотношения захваченной и не захваченной камерой частей совка, можно рассчитать объем металлолома во всем совке.

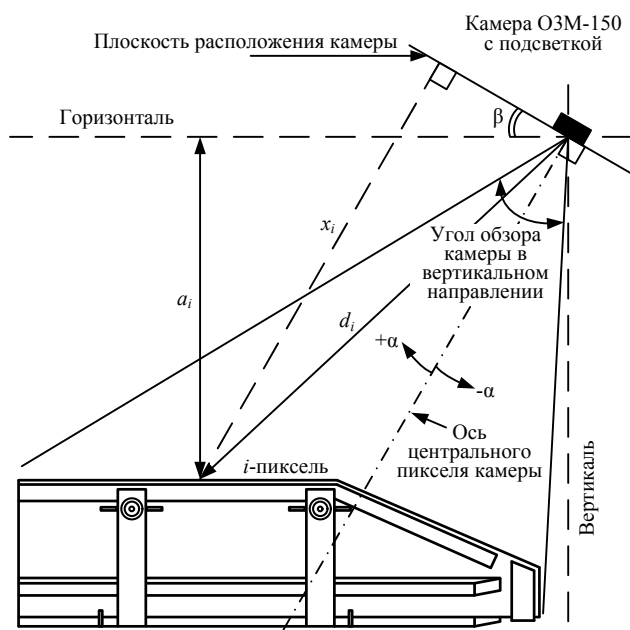


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения объема металлолома в совке для скрапа

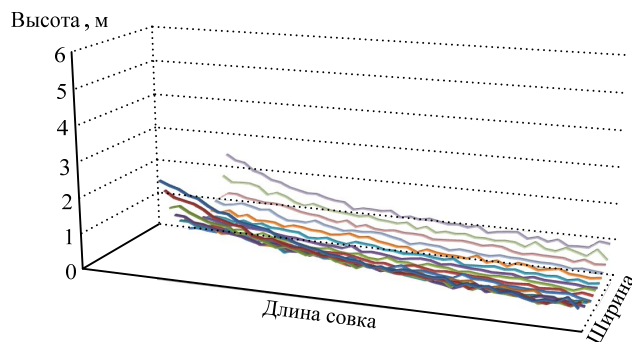


Рис. 3. Изображение пустого совка

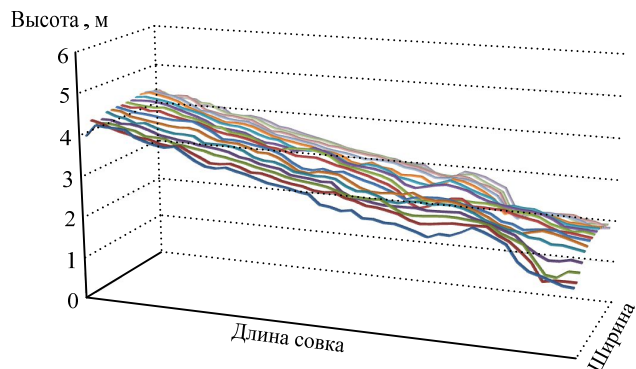


Рис. 4. Изображение совка с металлоломом

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОЛОМА В СОВКЕ

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать объем металлолома путем вычитания изображения пустого совка из изображения полного. Однако это сопряжено с довольно серьезной математической трудностью, проиллюстрированной на **рис. 5**.

Трудность заключается в следующем: из-за того, что камера расположена под углом к совку и ко всем измеряемым ей пикселям, i -й пиксель, измеренный при пустом и полном совках, попадает на разные участки совка (участки A и B на **рис. 5**). Причем расстояние между этими участками зависит от высоты поверхности металлолома над уровнем дна совка. Поэтому измерить высоту h_i простым вычитанием вычисленных расстояний a_i'' и a_i' не удастся.

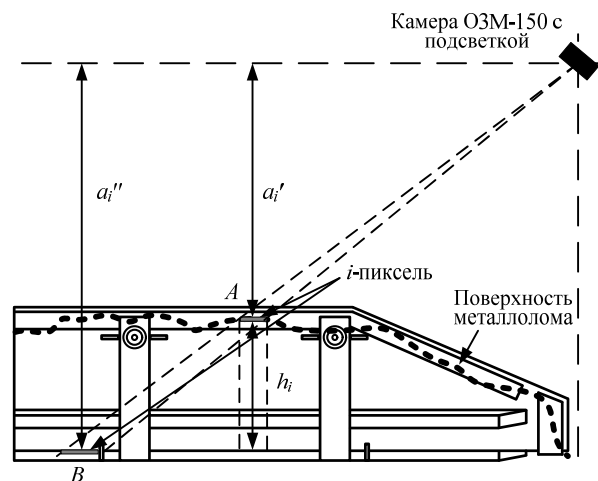


Рис. 5. Трудность использования пустого совка в качестве эталона при расчете объема металлолома

Одним из способов решения данной проблемы может быть расчет объема фигур пустого совка и полного совка, представленных на **рис. 6**. При этом для расчета объема металлолома нужно вычесть из объема фигуры полного совка объем фигуры пустого.

Объем рассчитывается как сумма индивидуальных объемов i -х параллелепипедов, образованных i -м пикселем в верхней части и плоскостью пола или поверхности платформы, на которой установлен совок, в нижней части.

Объем каждой из двух фигур рассчитывается по следующему выражению [18]:

$$V = \sum_{i=1}^n h_i \cdot y_i \cdot z_i, \quad (2)$$

где n – количество пикселей, попавших в ходе съемки на поверхность металлолома; h_i – расстояние от измеренного i -го пикселя до плоскости пола или поверхности платформы, на которой установлен совок.

Расстояние h_i рассчитывается по следующему выражению:

$$h_i = h_0 - a_i, \quad (3)$$

где h_0 – расстояние от камеры до плоскости пола или поверхности платформы, на которой установлен совок.

При использовании способа вычитания фигур полного и пустого совков в расчетах возникает неизбежная погрешность, связанная с тем, что при вычислении индивидуальных объемов пустого совка, если пиксели попадают на заднюю вертикальную стенку, то будет рассчитан и просуммирован объем всех параллелепипедов задней стенки, например, как показано на **рис. 7**.

В примере, показанном на **рис. 7**, будут рассчитаны объемы девяти параллелепипедов: 1, 2, 3 высотой h_a , 4, 5, 6 высотой h_b и 7, 8, 9 высотой h_c , в то время как для правильного вычисления объема пустого совка эти параллелепипеды не должны участвовать в расчете.

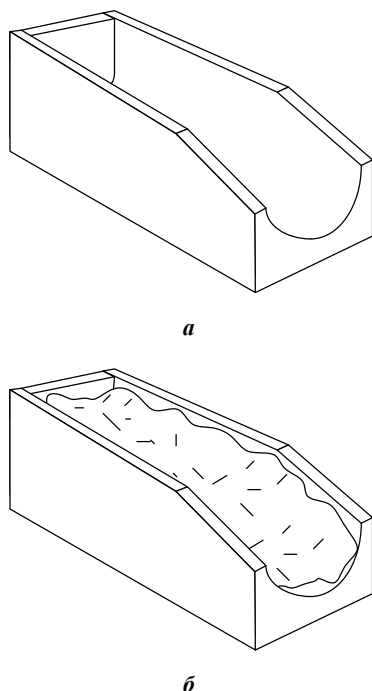


Рис. 6. Фигуры пустого (а) и полного совков (б)

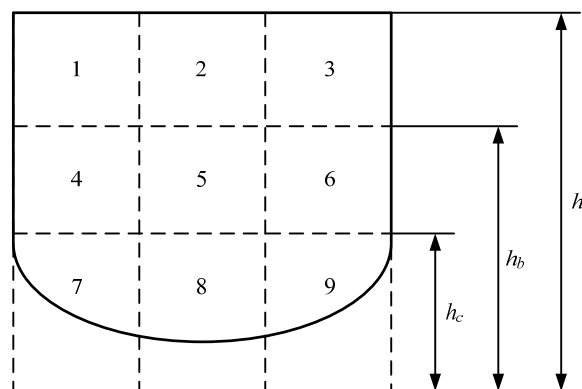


Рис. 7. Возникновение погрешности в расчетах из-за съемки задней стенки пустого совка

Из конфигурации экспериментальной установки (см. **рис. 2**) следует, что при перемещении по полю зрения камеры вдоль длинной стороны, когда пиксели попадают на дно пустого совка, координата x_i будет увеличиваться (в направлении от открытого края совка до задней стенки). При переходе через границу дна и задней стенки пустого совка координата x_i начнет уменьшаться. Следовательно, необходимо алгоритм вычисления объема фигуры пустого совка построить таким образом, чтобы он отбрасывал значения всех пикселей, находящихся за границей уменьшения координаты x_i .

Для того чтобы описанный алгоритм был применим и к определению задней стенки для совка с металлоломом, необходимо учесть в нем ряд моментов, связанных с формой поверхности загруженного металлолома.

Процедура загрузки совка осуществляется следующим образом: в пустой совок сверху засыпается металлолом, который при этом распределяется в совке случайным образом. Поверхность металлолома приближена к горизонтальной, за исключением незначительных по размеру участков, которые могут быть загорожены соседними частями металлолома. Хотя поверхность металлолома в совке специально не подготавливается для измерений с помощью 3D-камеры, но в связи с тем, что камера расположена сверху, практически вся поверхность является видимой для камеры. И ситуацией возникновения «мертвых» зон в данном случае можно пренебречь.

В связи с тем, что поверхность материала в совке может быть ориентирована под различными углами относительно дна совка, существуют такие конфигурации расположения металлолома, которые при перемещении по полю зрения камеры вдоль длинной стороны, в соответствии с описанным алгоритмом, приведут к уменьшению величины x_i , что будет ошибочно восприниматься как переход на заднюю стенку совка.

В ходе математической и статистической обработки экспериментальных данных были проанализированы координаты x_i изображений семи совков различной степени загрузки. Анализ показал, что в среднем для 269 пикселей из 1024 выполняется условие уменьшения координаты x_i при движении по снимку от начала совка к задней стенке. Это составляет 26,7% от общего количество пикселей. Причем около 70% таких пикселей приходится на ту половину совка, которая расположена ближе к камере, т.е. на начало совка. И только 30% пикселей, для которых уменьшается координата

x_i , приходится на ту половину совка, где расположена задняя стенка. Это связано с тем, что ближе к задней стенке совка, т.е. дальше от камеры, лучи длинноволнов, используемых в камере ОЗМ-150, падают на поверхность под все более острым углом к горизонту. И для того, чтобы координата x_i уменьшалась, поверхность металлолома должна быть ориентирована более вертикально, по сравнению с той же поверхностью, расположенной ближе к камере. Но поверхность металлолома в совке за редким исключением имеет преимущественно горизонтальную ориентацию.

Исходя из размеров совка, высоты и расположения камеры над его дном, а также характеристик используемой камеры было рассчитано, что на высоту задней стенки пустого совка в его самой высокой части приходится около 12 пикселей из 64. Поэтому поиск границы поверхности металлолома и задней стенки совка целесообразно проводить в пределах тех пикселей, где располагается граница дна и задней стенки для пустого совка. Причем граница дна и задней стенки пустого совка может сдвигаться в ту или иную сторону в зависимости от расположения камеры и угла ее наклона к горизонту. Это необходимо учесть при настройке системы.

С учетом вышесказанного алгоритм вычисления объема фигуры загруженного совка должен: во-первых, искать границу задней стенки в пределах только тех пикселей поля зрения, где она может находиться; и во-вторых, необходимо брать в расчет только самое последнее уменьшение координаты x_i , ближайшее к краю поля зрения камеры, отбрасывая остальные.

Используя выражение (2) и описанный выше алгоритм, были рассчитаны объемы фигур полного и пустого совков. Объем фигуры пустого совка составил 17,76 м³. Объем фигуры совка с металлоломом внутри составил 39,62 м³. Следовательно, вычитая первое значение из второго, получим объем металлолома в совке, равный 21,86 м³. Полученное значение близко к объему металлолома, рассчитанному другим способом для этого же снимка совка в [18]. Это означает, что способ использования трехмерного снимка пустого совка в качестве эталонного изображения обладает достаточной точностью и подходит для расчета объема металлолома в совке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований способа использования трехмерного снимка пустого совка в качестве эталонного изображения установлено, что рассчитать высоту металлолома над дном совка не получится простым вычитанием из изображения полного совка изображения пустого. Это связано с тем фактом, что все пиксели измеряемого поля видимости камеры, приходящиеся на внутреннюю часть совка, при пустом и полном совке попадают на разные его участки. Причем расстояние между этими участками пропорционально зависит от высоты металлолома в совке. Поэтому в работе был предложен способ расчета объема фигур отдельно для пустого совка, а затем для совка с металлоломом с последующим их вычитанием друг из друга. Учитывая, что измерение объема фигуры пустого совка можно выполнить один раз при настройке системы, а затем использовать при всех последующих

расчетах, предложенный алгоритм является простым в применении с математической точки зрения. Проведенные расчеты показали, что предложенный способ обладает достаточной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Ю.А., Бигеев В.А., Сергеев Д.С. Расчет технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием различных охладителей // *Металлургия стали*. 2014. №2(15). С. 45-48.
2. Макарова Е.А., Перистый М.М. Проблемы конвертерного производства стали и пути решения дефицита металлолома // *Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник докладов XXIII Всеукраинской научной конференции аспирантов и студентов*. Донецк: ДонНТУ, ДонНУ, 2013. Т.2. С. 158-159.
3. Шелягович А.В. Разработка режимов формирования металлозавалки в кислородном конвертере с применением композиционных материалов и исследование их влияния на технологические показатели выплавки стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Шелягович Андрей Владимирович. М., 2005.
4. T. Möller, H. Kraft, J. Frey, M. Albrecht and R. Lange, "Robust 3D measurement with PMD sensors," *Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH, Zurich, Switzerland*, 2005.
5. Q. Xu, Y. Huang, L. Xing, Z. Tian, Z. Fei and L. Zheng, "A fast method to measure the volume of a large cavity," *IEEE Access*, 2015, pp. 1555-1561. DOI:10.1109/ACCESS.2015.2476661.
6. Y.D. Chincholkar and S. Bangadkar, "A Review of ToF PMD Camera," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, Issue 5, 2015, pp. 4142-4149. DOI: 10.15662/ijareeie.2015.0405058.
7. Патерикин В.И. Оптические методы зондирования для наголовных средств измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов в реальном времени // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. №2. С. 44-48.
8. Крысин Д.Ю., Небылов А.В. Применение времяпролетных PMD-камер для определения дальности до водной поверхности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. №2 (84). С. 33-39.
9. Рутковский В.О., Рутковская М.А. Метод получения трехмерных цифровых моделей технических объектов, основанный на применении искусственных текстур // *Вестник СибГАУ*. 2010. №5. С. 249-254.
10. G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Advances in Optics and Photonics* 4, 2012, pp. 441-471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
11. Y.R. Huddart, "Non-contact free-form shape measurement for coordinate measuring machines," dissertation, Heriot-Watt University, 2010.
12. Скляренок М.С. Оценка точности методов трекинга для определения 2D-координат и скоростей механических систем по данным цифровой фотосъемки // *Компьютерная оптика*. 2015. №1. С. 125-135.
13. Борминский С.А., Солнцева А.В., Скворцов Б.В. Метод оптоэлектронного контроля жидкости в резервуаре // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. №4. С. 552-559.
14. M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm, "Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single Images Using Parallepipeds," 8th International Conference on Computer Vision (ICCV '01), Vancouver, Canada. IEEE Computer Society, 1, pp.142-148, 2001.
15. A. Criminisi, I. Reid and A. Zisserman, "SingleView-Metrology", University of Oxford, 1999.
16. X. Luan, "Experimental investigation of Photonic Mixer Device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology," dissertation, University of Siegen, 2001.

17. ОЗМ150. Фотоэлектрические датчики для распознавания объектов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ifm.com/products/ru/ds/O3M150.htm> (дата обращения: 05.05.2016).
18. Расчет насыпной плотности стального металлолома в совках для скрапа с использованием трехмерной камеры / Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э., Рабаджи Д.В. // Черные металлы. 2017. №4. С. 22-28.

Поступила в редакцию 05 февраля 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

USING REFERENCE MEASUREMENT OF AN EMPTY CHUTE WHEN CALCULATING THE VOLUME OF SCRAP METAL IN IT BY MEANS OF 3D CAMERA

Alexander N. Panov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Head of the Department of Innovation, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Evgeny E. Bodrov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forheartist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Snezhana I. Bodrova

Graduate Student, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forheartist@mail.ru.

Valeriya O. Mikheeva

Undergraduate Student, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Scrap-metal is used as a refrigerant during steelmaking process in a basic oxygen furnace where it can reach about twenty percent of the charge. The quantity of the scrap-metal loaded to the basic oxygen furnace determines the cost and quality of the finished steel. But bulk density of the scrap-metal is also an important technological factor that can affect the steelmaking process itself. That is why it is necessary to measure bulk density of the scrap-metal before it is loaded to the furnace. The mass of the scrap-metal in a chute is measured by the specialized scale. If the weight of the scrap-metal is known, the problem can be reduced to finding the volume of the scrap-metal in the chute. However, contact methods cannot solve this problem. This problem was solved by using non-contact method of measuring the distance to the surface of the scrap-metal in the chute by means of a time-of-flight 3D-camera. As a result of the experiment conducted at the oxygen converter shop, there were obtained images of an empty and a full chute. These images are represented by matrixes containing distances for three orthogonal directions. The algorithm used in this paper calculates the scrap-metal volume by subtracting the reference image of the empty chute from the image of the full chute. This work is based on industrial experiments at the oxygen converter shop of Magnitogorsk Iron and Steel Works. The paper describes the problems arising in the application of the described algorithm to the task of scrap-metal volume calculation and offers ways of solving these problems. The proposed algorithm was used to calculate the volume of the scrap-metal. Comparison of the calculated here volume with the volume of the same scrap-metal in the chute that was obtained earlier using a different approach showed that error does not exceed 5%.

Keywords: metals industry, steelmaking, furnaces, volume measurement, 3D-camera, scrap-metal, bulk density, basic oxygen furnace, non-contact measurement, scrap chute.

REFERENCES

1. Kolesnikov Ju.A., Bigeev V.A., Sergeev D.S. Calculation of technological parameters of steel smelting in a converter using various coolants. *Metallurgiya stali* [Metallurgy of steel], 2014, no.2(15), pp. 45-48. (In Russian)
2. Makarova E.A., Peristyj M.M. Problems of converter steel production and ways to solve scrap shortage problem. *Ohrana okruzhajushhej sredy i racionalnoe ispolzovanie prirodnih resursov. Sbornik dokladov HHIII Vseukrainskoj nauchnoj konferencii aspirantov i studentov* [Environmental protection and rational use of natural resources. Collection of reports of the XXIII All-Ukrainian scientific conference of graduate students and students], Donetsk: DonNTU, DonNU, 2013, vol.2, pp. 158-159. (In Russian)
3. Sheljagovich A.V. *Razrabotka rezhimov formirovaniya metallozavalki v kislorodnom konvertere s primeneniem kompozicionnyh materialov i issledovanie ih vlijaniya na tehnologicheskie pokazateli vyplavki stali*. Kand. Diss. [Development of modes for forming metal scrap in the oxygen converter with the use of composite materials and studying their effect on the technological parameters of steel smelting. Ph.D. Diss.]. Moscow, 2005.
4. T. Möller, H. Kraft, J. Frey, M. Albrecht and R. Lange, "Robust 3D measurement with PMD sensors," Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH, Zurich, Switzerland, 2005.
5. Q. Xu, Y. Huang, L. Xing, Z. Tian, Z. Fei and L. Zheng, "A fast method to measure the volume of a large cavity," *IEEE Access*, 2015, pp. 1555-1561. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2476661
6. Y.D. Chincholkar and S. Bangadkar, "A Review of ToF PMD Camera," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, iss. 5, 2015, pp. 4142-4149. DOI: 10.15662/ijareeie.2015.0405058
7. Paterikin V.I. Optical methods of sounding for head devices for measuring spatial parameters of the surface of three-dimensional objects in real time. *Interjekspos Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2015, no.2, pp. 44-48. (In Russian)
8. Krysin D.Ju., Nebylov A.V. The use of time-of-flight PMD cameras to determine the distance to the water surface. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, no.2 (84), pp. 33-39. (In Russian)

9. Rutkovskij V.O., Rutkovskaja M.A. The method of obtaining three-dimensional digital models of technical objects, based on the use of artificial textures. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of Siberian State University of Management], 2010, no.5, pp. 249-254. (In Russian)
10. G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Advances in Optics and Photonics* 4, 2012, pp. 441-471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
11. Y.R. Huddart, "Non-contact free-form shape measurement for coordinate measuring machines," dissertation, Heriot-Watt University, 2010.
12. Skljarenko M.S. Estimation of the accuracy of tracking methods for determining 2D coordinates and speeds of mechanical systems based on digital photography data. *Komputernaja optika* [Computer Optics], 2015, no.1, pp. 125-135. (In Russian)
13. Borminskij S.A., Solnceva A.V., Skvorcov B.V. The method of optoelectronic control of liquid in a tank. *Komputernaja optika* [Computer Optics], 2016, vol.40, no.4, pp. 552-559. (In Russian)
14. M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm, "Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single Images Using Parallelepipeds," 8th International Conference on Computer Vision (ICCV '01), Vancouver, Canada. IEEE Computer Society, 1, pp.142-148, 2001.
15. A. Criminisi, I. Reid and A. Zisserman, "Single View Metrology," University of Oxford, 1999.
16. X. Luan, "Experimental investigation of Photonic Mixer Device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology," dissertation, University of Siegen, 2001.
17. O3M150. 3D sensor for mobile applications. <https://www.ifm.com/gb/en/product/O3M150>.
18. Ishmetyev E.N., Chistjakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Rabadzhi D.V. Calculation of bulk density of steel scrap in scrap chutes using 3D camera. *Chernye metally* [Non-ferrous metals], 2017, no.4, pp. 22-28. (In Russian)

Использование эталонного измерения пустого совка при расчете объема металлолома в нем с помощью 3D-камер / А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, С.И. Бодрова, В.О. Михеева // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2(39). С. 57-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-57-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-57-62)

Panov A.N., Bodrov E.E., Bodrova S.I., Mikheeva V.O. Using Reference Measurement of an Empty Chute when Calculating the Volume of Scrap Metal in it by Means of 3D Camera. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 57-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-57-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-57-62)