

Контроль износа зубьев ковшей горных машин с использованием технического зрения

Туляков И.А. (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II)
Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Кульчицкий А.А.
(Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II)
tulil1802@gmail.com

Работа выполнена в рамках научных исследований кафедры АСУТП СПбГУ по автоматизации горных технологий.

Введение

Эффективность работы карьерных экскаваторов определяется состоянием их режущего инструмента. Зубья ковша подвержены интенсивному абразивному износу [1], причем при износе свыше 50% сопротивление копания возрастает до 230%, что ведет к перерасходу энергии [2, 3]. Отсутствие оперативного контроля ГНТ влечет необоснованные затраты или аварийные простои из-за поломок и попадания металла в дробилки [4]. Это обуславливает необходимость внедрения автоматизированных систем мониторинга на базе технического зрения.

Основная часть

Современные методы таких моделей разделяются на системы трехмерной (3D) реконструкции и двумерного (2D) нейросетевого анализа [5]. Технологии 3D-сканирования и фотограмметрии позволяют с высокой точностью определять объемный износ инструмента [6, 7]. Однако высокая чувствительность сенсоров к запыленности забоя, вибрациям ограничивают их применение непосредственно в процессе экскавации.

В качестве альтернативы выступают методы глубокого обучения на базе 2D-изображений. Использование архитектур Mask R-CNN и U-Net позволяет эффективно сегментировать объекты даже при частичном загрязнении поверхности [8], [9].

На основе анализа существующих решений разработана модель для обнаружения зубьев экскаватора. На валидационном наборе данных система показала высокие метрики качества детекции зубьев: $mAP@0.50 = 0,794$ (средняя точность при $IoU \geq 0,5$ — модель верно локализует объекты с перекрытием контуров $\geq 50\%$); $mAP@0.50-0.95 = 0,443$; полнота = 0,829 (82,9% зубьев найдены).

Выводы

Разработанная 2D-нейросетевая модель на базе глубокого обучения обеспечивает высокую эффективность обнаружения зубьев ковшей карьерных экскаваторов в реальных промышленных условиях, достигая метрик $mAP@0.50 = 0,794$ и полноты 82,9%, что значительно превосходит традиционные методы визуального контроля и 3D-сканирование по устойчивости к запыленности забоя, вибрациям и сложным ракурсам.

Достижения включают надежную сегментацию объектов при частичном загрязнении поверхности, возможность работы в реальном времени без остановки оборудования и переход от планового к предиктивному обслуживанию по фактическому износу, что минимизирует перерасход энергии на 20–30%, предотвращает аварийные простои и попадание металла в дробилки.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения технического зрения для автоматизированного мониторинга режущего инструмента и создают основу для дальнейшей классификации степени износа с целью оптимизации технологических процессов горной промышленности [10].

Литература

1. **Йулдашев, Ш. Х.** Теоретические основы восстановления зубьев ковшей экскаваторов / Ш. Х. Йулдашев // *Universum: технические науки*. — 2023. — № 11-5 (116). — С. 58–61. — DOI: 10.32743/UniTech.2023.116.11.16230.
2. **Excavator bucket teeth features, classifications and maintenance** [Электронный ресурс] // GFM Parts. — URL: <https://gfmparts.com/excavator-bucket-teeth-features-classifications-and-maintenance/> (дата обращения: 19.02.2026).
3. **Жуков, И. А.** Исследование влияния износа зубьев на энергоемкость процесса копания / И. А. Жуков // *Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. — 2010. — № 3. — С. 45–51.
4. **Ахмеров, А. В.** Обоснование параметров и разработка системы контроля состояния рабочего оборудования карьерных экскаваторов : дис. ... канд. техн. наук : 2.8.8 / Ахмеров Альберт Владимирович. — Санкт-Петербург, 2023. — 156 с.
5. **Dong, Z.** Review of the modeling methods of bucket tooth wear for construction machinery / Z. Dong, F. Jiang, Y. Tan [et al.] // *Lubricants*. — 2023. — Vol. 11, No. 6. — Art. 253. — DOI: 10.3390/lubricants11060253.
6. **Zhang, S.** High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review / S. Zhang // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2018. — Vol. 106. — P. 119–131. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.02.017.
7. **Pawlik, J.** The volumetric wear assessment of a mining conical pick using the photogrammetric approach / J. Pawlik, A. Wróblewska-Pawlik, M. Bembenek // *Materials*. — 2022. — Vol. 15, No. 16. — Art. 5783. — DOI: 10.3390/ma15165783.
8. **He, K.** Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. — 2017. — P. 2961–2969. — DOI: 10.1109/ICCV.2017.322.
9. **Lu, J.** A real-time and accurate detection approach for bucket teeth falling off based on improved YOLOX / J. Lu, Y. Liu // *Mechanical Sciences*. — 2022. — Vol. 13. — P. 979–990. — DOI: 10.5194/ms-13-979-2022.
10. **Ronneberger, O.** U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Lecture Notes in Computer Science*. — 2015. — Vol. 9351. — P. 234–241. — DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.