

УДК 621.867

Детекция аномалий на конвейерных лентах и гранулометрия

Селезнева Мария Сергеевна

ms.selezneva@bmstu.ru

Клычников Владимир Владимирович

v.v.klychnikov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Системы компьютерного зрения в тяжелой промышленности эксплуатируются в крайне суровых условиях. На горно-обогатительных комбинатах и других предприятиях присутствует повышенная запыленность, загрязненность, сильные вибрации от работающего оборудования, а также экстремальные температуры и влажность. Эти внешние факторы негативно влияют на надежность камер и датчиков, усложняя стабильную работу системы распознавания. Кроме того, освещение часто нестабильно — например, меняется естественный свет в карьерных условиях или мерцает искусственное освещение в цехах. В подземных рудниках ситуация усугубляется недостатком света и обилием угольной пыли, что ухудшает качество изображения и затрудняет различение объектов. Полностью устранить влияние этих факторов невозможно, поэтому при проектировании систем машинного зрения необходимо учитывать пыль, вибрации и перепады освещения как неизбежные условия работы. Специализированные промышленные камеры и осветители с защитой (например, IP65) используются для выдерживания грязной среды, а алгоритмы обучаются быть устойчивыми к шумам и помехам.

Ключевые слова: детекция аномалий, гранулометрия, конвейерная лента, контроль повреждений, нормальное состояние поверхности ленты

Anomaly detection on conveyor belts and granulometry

Selezneva Maria Sergeevna

ms.selezneva@bmstu.ru

Klychnikov Vladimir Vladimirovich

v.v.klychnikov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Computer vision systems in heavy industry operate in extremely harsh conditions. Mining and processing plants and other enterprises are subject to increased dustiness, pollution, strong vibrations from operating equipment, as well as extreme temperatures and humidity. These external factors negatively affect the reliability of cameras and sensors, complicating the stable operation of the recognition system. In addition, lighting is often unstable - for example, natural light changes in quarries or artificial lighting flickers in workshops. In underground mines, the situation is aggravated by a lack of light and an abundance of coal dust, which degrades image quality and makes it difficult to distinguish objects. It is impossible to completely eliminate the influence of these factors, so when designing machine vision systems, dust, vibrations, and changes in lighting must be taken into account as unavoidable operating conditions. Specialized industrial cameras and illuminators with protection (e.g. IP65) are used to withstand dirty environments, and algorithms are trained to be resistant to noise and interference.

Keywords: *anomaly detection, granulometry, conveyor belt, damage control, normal state of the belt surface*

Введение. Конвейерные ленты — одна из ключевых составляющих непрерывного производства на крупных предприятиях. По ним перемещаются сырье, полуфабрикаты и готовая продукция на всех этапах технологической цепочки. Без конвейеров невозможно обеспечить бесперебойную работу фабрики или рудника, занимающего территорию в несколько километров. Действительно, ленточные конвейеры повсеместно используются в горнодобывающей промышленности и других отраслях, поскольку экономично перемещают большие объемы сыпучих материалов.

Отдельные линии конвейеров могут достигать километров в длину при ширине ленты в несколько метров, пропуская тысячи тонн материала в час. Такая масштабная транспортная система является критически важной инфраструктурой предприятия. Любой вынужденный простой конвейера мгновенно сказывается на всем производстве — остановка главной ленты фактически парализует работу участка или завода. Простои обходятся чрезвычайно дорого, поэтому руководство стремится минимизировать неплановые остановки и поломки оборудования. В горнорудной отрасли простой даже на час может означать недопроизводство значительного объема продукции и прямые финансовые потери. Помимо упущенной выгоды, внезапные обрывы или аварии на ленте влекут дорогостоящий внеплановый ремонт. Например, разрыв конвейерной ленты — одна из самых серьезных неисправностей, полностью останавливает транспортировку и требует немедленной замены/ремонта полотна, что приводит к длительному простоям. Таким образом, поддержание работоспособности конвейеров напрямую влияет на эффективность и прибыльность производства [1].

Задача контроля и детекции повреждений ленты. Чтобы избежать катастрофических отказов, необходим непрерывный мониторинг состояния конвейерных лент. Даже небольшие дефекты (начинающиеся трещины, надрывы краев, локальный износ покрытия) без вмешательства могут очень быстро прогрессировать под нагрузкой высокоскоростной ленты, переходя в крупные разрывы. Выявление таких аномалий на ранней стадии позволяет провести плановый ремонт (например, вулканизацию или замену поврежденного сегмента) и предотвратить длительную остановку конвейера [2, 3]. Цель состоит в том, чтобы минимизировать время от возникновения дефекта до его обнаружения — тогда случаи, когда лента доходит до критического состояния (полного разрыва или аварии), станут редкостью.

Системы компьютерного зрения предлагают техническое решение для автоматического контроля ленты в режиме 24/7. Высокоскоростные камеры устанавливаются вдоль конвейерной линии и непрерывно снимают полотно ленты в движении. Алгоритмы машинного зрения (часто с использованием ИИ) анализируют поток изображений в реальном времени и обучены распознавать нормальное состояние поверхности ленты [4].

Малейшие отклонения от эталона фиксируются как аномалии — это могут быть появившиеся трещины, дыры, порезы, отслоение слоя, а также проблемы выравнивания (схождение ленты в сторону) или попадание на ленту посторонних предметов. Когда система обнаруживает аномалию, она мгновенно формирует тревожное сообщение. Как правило, указывается участок ленты и характер дефекта, после чего персонал технической службы может оперативно отреагировать [5].

Автоматическая дефектоскопия лент сталкивается с упомянутыми ранее сложностями среды. Камеры могут покрываться пылью или грязью, ухудшая обзор, поэтому нередко применяются обдув или очистители для оптики. Вибрация конвейерных конструкций требует жесткого крепления камер или использования стабилизации, а сами камеры выбираются в пыле- и влагозащищенном исполнении, устойчивом к сотрясениям.

Отдельная проблема — скорость движения ленты. В промышленности конвейеры могут двигаться со скоростью порядка 4 м/с, что означает перемещение полотна на десятки сантиметров между кадровыми отсчетами обычной камеры. Для надежного обнаружения мелких дефектов при такой скорости требуются высокое разрешение и частота съемки.

Исследования показывают, что по мере роста скорости конвейера приходится увеличивать частоту кадров камеры, иначе система не успеет за быстро движущимися объектами. Например, на угольных комбайнах применяются камеры с частотой ~40 кадров/с при Full HD разрешении, чтобы зафиксировать мелкие признаки повреждений на ленте, движущейся со скоростью 4 м/с. Обработка такого потока данных должна быть оптимизирована, часто реализуется на встроенных вычислителях (edge-устройствах) прямо возле конвейера, чтобы сократить задержки. Кроме того, алгоритмы детекции обучаются распознавать дефекты на разном фоне и при разном освещении, повышая их устойчивость. Современные методы (например, на основе сверточных нейросетей) способны выявлять характерные паттерны износа или разрыва на изображениях ленты. Таким образом, задача детекции аномалий конвейерных лент сводится к созданию высоконадежной системы зрения, которая в реальном времени и при любых внешних воздействиях выявляет зарождающиеся дефекты и позволяет предотвратить аварийный простой оборудования [6].

Задача гранулометрического анализа материалов. Другой важной задачей компьютерного зрения в промышленности является гранулометрия — автоматический анализ распределения размеров частиц и формы гранул транспортируемого материала. Например, на конвейерах горно-обогатительных фабрик перемещается дробленая руда или уголь, и фракционный состав этого потока может сильно варьироваться: на ленте одновременно присутствуют и большие фрагменты породы, и мелкие пылевидные частицы. Знание распределения размеров частиц (PSD) в реальном времени крайне важно для оптимизации процессов дробления, помола и сортировки. Имея точную информацию о крупности материала на выходе дробилок, можно ре-

гулировать режимы работы оборудования (например, скорость подачи, силу дробления) для поддержания оптимальной фракции, что повышает эффективность и экономит энергию. Кроме того, гранулометрический контроль обеспечивает стабильное качество продукта и предотвращает проблемы: слишком крупные нераздробленные куски могут привести к затору или поломке на следующем этапе (например, застрять в питателе или мельнице), а избыток мелочи (*fines*) ухудшает работу мельниц и увеличивает энергозатраты. Таким образом, задача гранулометрии — непрерывно измерять размерный состав потока материала и своевременно выявлять отклонения (например, выход содержания крупных кусков за допуск).

Традиционные методы измерения гранулометрии (просеивание проб, лазерные дифрактометры и т. п.) трудоемки и не дают оперативного результата. Внедрение систем компьютерного зрения позволяет проводить онлайн-анализ прямо на ленте без прерывания процесса, обеспечивая данные для автоматизированного управления технологией. В типичной системе над конвейерной лентой устанавливается камера (или несколько камер). Программное обеспечение обрабатывает изображения потока материала, выделяя отдельные частицы и измеряя их размеры.

Современные решения могут вычислять не только распределение размеров (например, процент содержания каждой фракции), но и определять форму частиц (округлость, вытянутость) и общий объем насыпи на ленте. Анализ формы гранул важен, например в контроле качеств руды или щебня — слишком плоские или игольчатые частицы могут быть нежелательны для дальнейшего использования. Также система способна обнаруживать посторонние объекты среди потока материала. Выявление таких аномалий в массе руды позволяет вовремя изъять потенциально опасный предмет, который мог бы повредить дробильное оборудование.

Технические сложности гранулометрии во многом схожи с описанными ранее. Запыленность и переменная освещенность осложняют получение четких изображений; темный влажный уголь на фоне черной ленты — трудная сцена для классических камер, требующая чувствительных сенсоров и продуманной подсветки. Однако своя специфическая проблема гранулометрического анализа — это перекрытие частиц. Материал на ленте образует насыпь, где куски породы лежат кучно, частично закрывая друг друга. На обычном 2D-изображении крайне трудно разделить соприкасающиеся или накладывающиеся зерна, из-за чего точность оценки размера каждого фрагмента падает. Простые методы компьютерного зрения, основанные только на поиске граней в плоском изображении, ранее показывали ограниченный успех именно из-за этой проблемы наложения частиц. Поэтому в промышленных решениях все чаще применяются трехмерные методы зрения. Один из подходов — лазерное сканирование профиля: на материал светится линейный лазер, камера регистрирует линию лазера, деформированную рельефом насыпи, и на основе триангуляции строится точный 3D-профиль поверхности конвейерного груза. Последовательность таких профилей позволяет реконструировать

трехмерную поверхность потока материала и отделить отдельные фрагменты, даже если они прилегают друг к другу.

Существующие коммерческие системы (например, 3DPM от компании Optimation) используют стереовизию или лазерный профилирующий сканер и способны с высокой точностью измерять размеры частиц на широких и быстро движущихся лентах. Специализированные 3D-камеры промышленного класса, обладающие высокой чувствительностью и скоростью, помещены в защищенные кожухи и рассчитаны на круглосуточную работу в пыльной среде с минимальным обслуживанием. Полученные данные обрабатываются алгоритмами, вычисляющими распределение размеров, форму частиц и скорость/объем потока.

Например, система 3D-визуализации, описанная в источниках, помимо PSD выдает информацию о объемном расходе материала и может различать формы частиц. Благодаря высокой точности, она обнаруживает даже крупные валуны или негабаритные объекты (или те же металлические включения) в потоке, что ценно для защиты оборудования от повреждений.

Заключение. Подводя итог, в рамках промышленной детекции аномалий и гранулометрического анализа решаются взаимодополняющие задачи. Первая — это контроль самой конвейерной ленты, своевременное обнаружение ее механических повреждений и других неполадок для предотвращения аварийных простоев. Вторая — это контроль транспортируемого материала, измерение его гранулометрических характеристик и выявление аномалий состава (таких как недопустимо крупные куски или посторонние объекты) для оптимизации технологического процесса. Обе задачи крайне важны для поддержания бесперебойной, безопасной и эффективной работы предприятия.

Реализация их с помощью систем машинного зрения требует преодоления сложных внешних условий, обеспечения высокоточной и быстрой обработки данных, но современные разработки показывают, что это возможно при правильном подходе. В результате завод получает инструмент для предиктивного обслуживания и оперативного контроля качества, что повышает общую производительность и снижает издержки на ремонт и брак продукции.

Список источников

- [1] Бадаева В.Б. Совершенствование методов аудита качества на производстве конвейерных лент. *Научный аспект*, 2023, т. 6, № 11, с. 734–741.
- [2] Мосин В.Г., Козловский В.Н., Пантюхин О.В. Детекция аномалий информационного канала на основе прогнозирующих моделей в решении задач анализа качества контента. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2024, № 3, с. 421–425. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-421-422>
- [3] Грудачев А.Я., Гутаревич В.О. Результаты испытаний на разрыв стыкового соединения конвейерной ленты. *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*, 2023, № 2 (94), с. 17–26.
- [4] Атабалов Х.Б., Мухамметназаров А.С., Текемадов С.А., Аннамырадов С.Б. Разработка системы автоматического контроля качества продукции на конвейерной ленте с исполь-

зованием методов машинного зрения. *Цифровые технологии в научном развитии: новые концептуальные подходы. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Уфа, ООО «ОМЕГА САЙНС», 2024, с. 12–14.

- [5] Силаев А.А., Григорьев М.С. Сортировка предметов на конвейерной ленте роботоманипулятором Dobot Magician. *Автоматизация. Современные технологии*, 2022, т. 76, № 3, с. 126–129. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2022-76-3-126-129>
- [6] Захаров А.Ю., Ерофеева Н.В. Возможности снижения динамических нагрузок на конвейерную ленту. *Горное оборудование и электромеханика*, 2018, № 6 (140), с. 3–14. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2018-6-3-13>