Математическая модель процесса локального ремонта дорожного покрытия с использованием строительного 3D-принтера

Кротов Олег Михайлович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), krotovom@mail.ru,

В статье рассмотрена математическая модель процесса локального ремонта дорожного покрытия с использованием дорожного строительного 3D-принтера. Предложенный подход основан на цифровом определении геометрии дефекта, расчёте требуемого объёма битумоминеральной смеси, формировании траектории печатающей головки, дозированной послойной экструзии материала и последующем контроле качества восстановленной поверхности. Разработанная модель объединяет описание глубины дефекта, области ремонта, процесса формирования слоя, баланса объёма, влияния уплотнения, ограничения по расходу материала и скорости перемещения рабочего органа, а также целевую функцию минимизации затрат. Для учёта погрешности данных LiDAR-сканера или камеры в модель введена составляющая ошибки измерения глубины дефекта. Сформулировано условие полного заполнения дефекта, согласно которому объём уложенного материала после уплотнения должен быть не меньше объёма повреждения, и критерий равномерности восстановленной поверхности через стандартное отклонение конечной толщины слоя. Определены технологические ограничения, связанные с производительностью экструдера, скоростью перемещения печатающей головки и зоной досягаемости манипулятора. Показано, что применение аддитивных технологий при локальном ремонте позволяет повысить точность заполнения дефекта, снизить перерасход материала и уменьшить влияние человеческого фактора по сравнению со струйно-инъекционным методом. Модель может служить основой для проектирования дорожного строительного 3D-принтера, разработки алгоритмов управления подачей материала и регламента локального ремонта.

Ключевые слова: локальный ремонт, дорожное покрытие, 3D-печать, битумоминеральная смесь, математическая модель, экструзия, LiDAR, траектория укладки, контроль качества.

Введение

Локальный ремонт дорожного покрытия является одним из наиболее распространённых видов восстановительных работ [1-3], направленных на устранение выбоин, трещин, колейности, просадок и иных ограниченных по площади повреждений без полной замены конструктивных слоёв дорожной одежды [4-5]. Качество выполнения таких работ определяет ровность, водонепроницаемость, сцепные свойства и несущую способность восстановленного участка покрытия [6-7]. В условиях высокой транспортной нагрузки особое значение приобретают технологии, позволяющие выполнять ремонт оперативно, с минимальным ограничением движения и с повторяемым качеством результата [8-9].

Традиционные технологии локального ремонта, включая горячий и холодный ямочный ремонт, а также струйно-инъекционный метод, обладают рядом ограничений: зависимостью от квалификации оператора, значительным перерасходом материала, неравномерностью заполнения дефекта, сложностью контроля фактического объёма уложенной смеси и недостаточной долговечностью заплат [10-11]. В связи с этим актуальной является разработка научно обоснованных технических и технологических решений, основанных на цифровизации и автоматизации процесса ремонта [12-13].

Одним из перспективных направлений является применение строительного дорожного 3D-принтера, обеспечивающего точечную укладку битумоминеральной смеси в дефект дорожного покрытия по заранее рассчитанной траектории [14-15]. Такой подход позволяет перейти от визуального и ручного управления процессом к цифровому циклу ремонта [16-17]: сканирование дефекта, построение модели, расчёт объёма материала, послойная укладка, уплотнение и повторный контроль поверхности.

Целью исследования является разработка математической модели процесса локального ремонта дорожного покрытия с использованием строительного 3D-принтера, позволяющей описать взаимосвязь между геометрией дефекта, расходом материала, траекторией движения печатающей головки, уплотнением слоя, качеством восстановленной поверхности и затратами на выполнение ремонтных работ.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- формализовать геометрию дефекта дорожного покрытия через функцию глубины и область ремонта;
- описать процесс формирования слоя битумоминеральной смеси при послойной экструзии;
- сформулировать условие баланса объёма между дефектом и уложенным материалом;
- учесть влияние уплотнения на конечную толщину восстановленного слоя;
- задать критерий равномерности поверхности после ремонта;
- сформировать целевую функцию минимизации затрат с учётом стоимости материала, времени работы оборудования и энергопотребления;
- определить технологические ограничения, связанные с производительностью экструдера, скоростью перемещения головки и зоной досягаемости рабочего органа;
- сопоставить аддитивный подход со струйно-инъекционным методом по точности заполнения, объёму отходов, равномерности слоя и влиянию человеческого фактора.

Материалы и методы исследования

Объектом моделирования является процесс локального восстановления дефекта дорожного покрытия, выполняемый мобильной роботизированной системой с экструзионной печатающей головкой. В качестве ремонтного материала рассматривается битумоминеральная смесь, подаваемая в область дефекта дозированно и послойно. Для определения геометрии повреждения предусматривается применение LiDAR-сканера, стереокамеры или иного датчика, формирующего цифровое представление поверхности покрытия [21].

Методологическую основу исследования составляют методы математического моделирования технологических процессов, геометрического описания поверхности, интегрального расчёта объёма, оптимизации затрат и формализации технологических ограничений. Основные обозначения, принятые в модели, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Обозначения модели

Обозначение	Содержание	Единица измерения
x, y	координаты точки поверхности дорожного покрытия	м
h(x,y)	измеренная высота поверхности покрытия	м
$H_{ref}(x,y)$	эталонная высота поверхности без дефекта	м
$D(x,y)$	глубина дефекта в точке поверхности	м
A_d	область дефекта, подлежащая ремонту	м²

$Q(\tau)$	расход битумоминеральной смеси	кг/с или м³/с
$S(x,y,t)$	толщина уложенного слоя к моменту времени t	м
$h_{final}(x,y)$	толщина слоя после уплотнения	м
δ	коэффициент уплотнения материала	безразмерный
M	масса уложенной смеси	кг
E	энергопотребление системы	Дж или кВт·ч
$\sigma(h_{final})$	стандартное отклонение толщины восстановленного слоя	м
ε	допустимое отклонение поверхности по ровности	м

Первым этапом процесса является получение цифровой модели дефекта. Высота реальной поверхности определяется датчиками машинного зрения [22]. Эталонная поверхность задаётся как идеальная плоскость или интерполируется по участкам дорожного покрытия, не имеющим повреждений [23]. Глубина дефекта определяется разностью между эталонной и фактической поверхностью:

$$D(x,y) = H_{ref}(x,y) - H_{real}(x,y),\ \text{м}$$

Область дефекта включает множество точек, в которых глубина повреждения превышает заданное пороговое значение [24]:

$$A_d = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid D(x,y) > \delta_{defect}\},\ \text{м}^2$$

Для учёта погрешности измерения высоты поверхности вводится модель измерения глубины дефекта:

$$H_{measured}(x,y) = H_{real}(x,y) + \varepsilon(x,y),\ \ \varepsilon(x,y) \sim \mathcal{N}(0,\sigma_{noise}),\ \text{м}$$

Таблица 2
Обозначения модели

$H_{measured}(x,y)$	Измеренная глубина дефекта в точке (x,y), м
$H_{real}(x,y)$	Реальная (истинная) глубина дефекта, м
$\varepsilon(x,y)$	Ошибка измерения (шум), м
$\mathcal{N}(0,\sigma_{noise})$	Нормальное распределение с нулевым средним и стандартным отклонением σ_{noise}, м

Данная зависимость позволяет учитывать возможное отклонение данных LiDAR-сканера или камеры от истинной геометрии дефекта [25]. Параметр σ_{noise} характеризует стандартное отклонение ошибки измерения и имеет ту же размерность, что и измеряемая глубина дефекта, то есть метры.

Процесс укладки ремонтного материала описывается функцией S(x,y,t), определяющей толщину слоя, сформированного в точке поверхности к моменту времени t. При движении печатающей головки материал подаётся из сопла и распределяется по поверхности дефекта в соответствии с функцией распределения потока:

$$S(x,y,t) = \int_0^t Q(\tau) \cdot G\big(x - x_h(\tau), y - y_h(\tau)\big) d_\tau,\ \text{м}$$

Таблица 3
Обозначения модели формирования слоя битумоминеральной смеси

$S(x,y,t)$	Толщина уложенного слоя в точке (x,y) к моменту времени t, м
$Q(\tau)$	Расход материалов (объём в единицу времени) в момент τ, кг/с
$G\big(x - x_h(\tau), y - y_h(\tau)\big) d_\tau$	Функция распределения потока материала – как он растекается по поверхности
$x_h(\tau), y_h(\tau))$	Координаты головки принтера в момент времени τ
d_τ	Малый временной интервал, с
$\int_0^t$	Интегрирование по времени от начала до момента t

После укладки слой подвергается уплотнению. Для учёта объёмной усадки материала вводится коэффициент уплотнения δ. Конечная толщина восстановленного слоя определяется выражением:

$$\mathrm{h_{final}(x,y)} = \mathrm{S}(x,y,t_{fill}) \cdot (1-\delta),\ \text{м}$$

Коэффициент δ является безразмерной величиной и характеризует относительное уменьшение толщины слоя после уплотнения. Для битумоминеральных смесей при технологическом уплотнении он может задаваться в зависимости от состава смеси, температуры, нагрузки уплотняющего узла и требуемой плотности заплаты.

Для обеспечения работоспособности восстановленного участка объём уложенного материала после уплотнения должен быть не меньше объёма дефекта. Объём дефекта определяется интегрированием функции глубины по области повреждения:

$$V_{def} = \iint_{A_d} D(x,y) dxdy,\ \text{м}^3$$

Объём уложенного материала после уплотнения определяется аналогично:

$$V_{mix} = \iint_{A_d} h_{final}(x,y) dxdy,\ \text{м}^3$$

Условие полного заполнения дефекта имеет вид:

$$V_{mix} = \iint_{A_d} h_{final}(x,y) dxdy \geq V_{detect} = \iint_{A_d} D(x,y) dxdy$$

Данное ограничение является базовым технологическим требованием модели. При его нарушении в восстановленном участке остаются зоны недолива, что приводит к локальному накоплению воды, повышенным динамическим нагрузкам от колёс транспорта и ускоренному разрушению заплаты.

После завершения печати и уплотнения поверхность должна соответствовать требованиям по ровности. В модели равномерность оценивается через стандартное отклонение конечной толщины слоя относительно требуемого уровня:

$$\sigma(h_{final}) \leq \varepsilon,\ \text{м}$$

Поскольку величина h_{final} измеряется в метрах, стандартное отклонение $\sigma(h_{final})$ также имеет размерность метра. При инженерной интерпретации допуск ε может задаваться в миллиметрах, однако в математической модели, построенной в системе СИ, он должен быть приведён к метрам. Указанное условие позволяет ограничить образование бугров, просадок и зон неравномерной толщины, которые являются одной из причин преждевременного разрушения локального ремонта.

Для выбора рационального режима работы 3D-принтера вводится целевая функция, характеризующая суммарные затраты на выполнение ремонта. Она учитывает стоимость ремонтной смеси, время работы оборудования и энергопотребление:

$$C = c_m \cdot M + c_t \cdot t_{fill} + c_e \cdot E,\ \text{руб}$$

C – общая стоимость, руб;
c_m – стоимость смеси, руб/кг;
M – масса смеси, кг;
c_t – стоимость времени работы, руб/с;
t_{fill} – время укладки, с;
c_e – стоимость энергии, руб/(кВт·ч);
E – энергопотребление, кВт·ч.

Масса материала определяется через плотность смеси и объём уложенного слоя:

$$M = \iint_{A_d} \rho \cdot h_{final}(x,y) dxdy,\ \text{кг}$$

ρ – плотность смеси (кг/м³),
$h_{final}(x,y)$ - толщина слоя после уплотнения (м),
A_d - область дефекта (м²).

Энергопотребление системы за время ремонта определяется интегрированием мощности по времени:

$$\mathrm{E} = \int_0^{\mathrm{t_{fill}}} \mathrm{P(t)dt}$$

P(t)- мощность системы в момент времени t (Вт).

При использовании киловатт и часов энергия выражается в кВт·ч, что удобно для экономической оценки производственного процесса.

Для практического применения модель должна учитывать технические возможности оборудования. Основные ограничения приведены в таблице 4.

Таблица 4
Технологические ограничения модели

Ограничение	Описание
$\mathrm{V_{mix}} \geq \mathrm{V_{defect}}$	Условие заполнения дефекта. Чтобы дефект был полностью заделан, объем уложенной смеси должен быть не меньше, чем объем "провала".
$\mathrm{h_{min}} \leq \mathrm{h_{final}(x,y)} \leq \mathrm{h_{max}},\ \forall(\mathrm{x,y}) \in \mathrm{A_d}$	Толщина слоя в каждой точке. Каждая точка должна иметь толщину слоя в установленных пределах. Это гарантирует качество укладки и соответствие техническим нормам.
$\sigma(h_{final}) \leq \varepsilon$	Шероховатость поверхности. Это условие обеспечивает равномерность укладки. Если σ слишком велико – значит, есть участки с недоливом или переизбытком материала.
$\mathrm{Q(t)} \leq Q_{max}$	Расход материала не превышает максимальный. Нельзя подавать материал быстрее, чем позволяет оборудование.
$\lvert\vec{r}_h(t)\rvert \leq v_{max}$	Скорость движения головки. Скорость принтера не может превышать технические возможности машины.
$\lvert\vec{r}_h(t) - \vec{r}_{\text{дефекта}}\rvert \leq L_{\text{манипулятора}}$	Длина манипулятора. Головка укладчика должна находиться в пределах досягаемости, чтобы точно укладывать материал

Струйно-инъекционный метод является одним из распространённых способов локального ремонта, однако его точность определяется в значительной степени действиями оператора. Материал подаётся воздушным потоком, вследствие чего часть смеси может выходить за пределы дефекта, а глубинные участки повреждения заполняться неравномерно. В отличие от этого, 3D-печать использует цифровую модель дефекта и управляемую траекторию, что позволяет задавать объём материала до начала ремонта и уточнять его в процессе обратной связи.

Таблица 5
Сравнение со струйно-инъекционным методом

Критерий	Струйно-инъекционный метод	3D-печать дорожным принтером
Точность заполнения	зависит от оператора; возможны недоливы и переизбыток	задаётся цифровой моделью дефекта и адаптивным расходом
Перерасход материала	возможен из-за разлёта смеси за пределы дефекта	снижается за счёт укладки строго в область Ad
Равномерность слоя	толщина слоя контролируется визуально	контролируется условием $\sigma(h_{final}) \leq \varepsilon$
Человеческий фактор	высокий: оператор управляет направлением и временем подачи	снижен за счёт автоматической траектории и датчиков
Сложные дефекты	заполнение неправильной формы затруднено	траектория может адаптироваться к произвольной геометрии
Контроль качества	преимущественно визуальный	повторное сканирование и сравнение с эталонной поверхностью

Практическое значение разработанной модели заключается в возможности её применения при проектировании дорожного строительного 3D-принтера, выборе параметров экструзионной головки, расчёте требуемого объёма битумоминеральной смеси, настройке алгоритмов управления подачей материала и разработке производственного регламента локального ремонта. Модель может использоваться главным технологом при назначении режимов печати, оценке расхода материала и контроле качества восстановленных участков.

Для оборудования на основе данной модели целесообразно предусмотреть следующие узлы: сканирующий модуль для определения геометрии дефекта; экструдер с регулируемым расходом; сопло, подобранное по максимальной крупности заполнителя; бункер с системой поддержания однородности смеси; манипулятор или портальную систему позиционирования; узел очистки дефекта; уплотняющее устройство; программный модуль построения траектории; систему повторного контроля поверхности. Совместная работа этих узлов обеспечивает переход от ручного ремонта к управляемому цифровому технологическому процессу [20].

Результаты и обсуждение

Разработанная математическая модель позволяет описать полный цикл локального ремонта дорожного покрытия: от первичного сканирования дефекта до оценки качества восстановленного участка. Наиболее важным результатом является формализация связи между геометрией повреждения и количеством материала, подаваемого в процессе печати. Это позволяет исключить ситуацию, при которой объём смеси определяется визуально или эмпирически, как это часто происходит при традиционных методах ремонта.

Использование функции глубины D(x,y) и области дефекта Ad создаёт расчётную основу для определения объёма повреждения. Модель формирования слоя S(x,y,t) позволяет связать расход материала Q(t), траекторию головки и фактическую толщину слоя. Учёт уплотнения через коэффициент δ обеспечивает более корректное прогнозирование конечной геометрии заплаты. Критерий σ(h_final) ≤ ε позволяет ввести количественный показатель равномерности поверхности, а не ограничиваться визуальной оценкой качества.

В сравнении со струйно-инъекционным методом предлагаемый подход обеспечивает более высокий уровень управляемости процесса. Если при струйной подаче материал распределяется потоком воздуха и зависит от действий оператора, то при 3D-печати каждый участок дефекта заполняется по рассчитанной траектории с заданным расходом. Это создаёт предпосылки для снижения перерасхода материала, повышения повторяемости качества и формирования базы данных выполненных ремонтов.

Ограничением разработанной модели является необходимость экспериментального уточнения параметров для конкретного материала и оборудования. В частности, требуют дальнейшей проверки коэффициент уплотнения, функция распределения потока F, зависимость вязкости смеси от температуры, допустимая скорость движения печатающей головки и устойчивость слоя при послойной укладке [18]. Поэтому следующими этапами исследования должны стать лабораторные испытания битумоминеральной смеси, стендовая проверка экструдера и натурные испытания опытного образца дорожного 3D-принтера [19].

Заключение

В статье разработана математическая модель процесса локального ремонта дорожного покрытия с использованием строительного 3D-принтера. Модель включает описание геометрии дефекта, формирование области ремонта, учёт погрешности измерений, функцию послойной укладки битумоминеральной смеси, условие баланса объёма, влияние уплотнения, критерий равномерности восстановленной поверхности, целевую функцию затрат и технологические ограничения оборудования.

Показано, что цифровое определение геометрии дефекта позволяет перейти к расчётному назначению объёма ремонтной смеси и траектории движения печатающей головки. Это обеспечивает научно обоснованную связь между состоянием дорожного покрытия, параметрами работы оборудования и качеством восстановленного участка.

Предложенный подход отличается от струйно-инъекционного метода более точным дозированием материала, возможностью адаптации траектории к сложной форме дефекта, снижением влияния человеческого фактора и наличием количественного контроля качества после ремонта. Разработанная модель может служить основой для создания дорожного строительного 3D-принтера, разработки алгоритмов управления подачей материала и проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Литература

1. Jackson R.J., Wojcik A.B., Miodownik M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties // Materials & Design. 2018. Vol. 160. P. 468-474. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.030.
2. Cantisani G., D'Andrea A., Di Mascio P., Moretti L., Fiore N., Petrelli M., Polidori C., Venturini L. Materials study to implement a 3D printer system to repair road pavement potholes // Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 69. P. 91-98. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.149.
3. Gong F., Cheng X., Fang B., Cheng C., You Z. et al. Prospect of 3D printing technologies in maintenance of asphalt pavement cracks and potholes // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 397. Article 136551. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136551.
4. Gong F., Cheng X., Fang B. et al. A Review on the Application of 3D Printing Technology in Pavement Maintenance Engineering // Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 7. Article 6237. DOI: 10.3390/su15076237.
5. Kwon B.J., Kim D., Rhee S.K., Kim Y.R. Spray injection patching for pothole repair using 100 percent reclaimed asphalt pavement // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 166. P. 445-451. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.145.
6. Dong Q., Huang B., Zhao S. Field and laboratory evaluation of winter season pavement pothole patching materials // International Journal of Pavement Engineering. 2014. Vol. 15, No. 4. P. 279-289. DOI: 10.1080/10298436.2013.814772.
7. Hafezzadeh R., Autelitano F., Giuliani F. Asphalt-based cold patches for repairing road potholes: an overview // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 306. Article 124870. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124870.
8. Hafezzadeh R., Autelitano F., Giuliani F. Performance-related methods for the characterization of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Article e02600. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02600.
9. Wang T., Dra Y.A.S.S., Cai X., Cheng Z., Zhang D., Lin Y., Yu H. Advanced cold patching materials (CPMs) for asphalt pavement pothole rehabilitation: State of the art // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 366. Article 133001. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133001.
10. Li L., Huang Y., Shao Z., Ren D. An experimental investigation on the repairing performance and fatigue life of asphalt pavement potholes with an inclined interface joint // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 7. Article 597523. DOI: 10.3389/fmats.2020.597523.
11. Han S., Liu M., Shang W., Qi X., Zhang Z., Dong S. Timely and durable polymer modified patching materials for pothole repairs in low temperature and wet conditions // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 9. Article 1949. DOI: 10.3390/app9091949.
12. Buswell R.A., de Silva W.R.L., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. P. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
13. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. 2016. Vol. 11, No. 3. P. 209-225. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.
14. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. Vol. 45, No. 8. P. 1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
15. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42, No. 3. P. 558-566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
16. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. P. 103-116. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
17. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders // Materials & Design. 2016. Vol. 100. P. 102-109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097.
18. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 145. P. 639-647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.

19. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. P. 477-490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144.
20. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
21. Ma N., Fan J., Wang W., Wu J., Jiang Y., Xie L., Fan R. Computer vision for road imaging and pothole detection: a state-of-the-art review of systems and algorithms // Transportation Safety and Environment. 2022. Vol. 4, No. 4. Article tdac026. DOI: 10.1093/tse/tdac026.
22. Чуфаров И.В. Методы определения дефектов поверхности изделий из металлов и их сплавов с помощью методов машинного зрения // Вопросы природопользования. 2025. Т. 4, № 1. С. 61-64.
23. Fan R., Ozgunalp U., Wang Y., Liu M., Pitas I. Rethinking road surface 3-D reconstruction and pothole detection: From perspective transformation to disparity map segmentation // IEEE Transactions on Cybernetics. 2022. Vol. 52, No. 7. P. 5799-5808.
24. Tsai Y.-C., Chatterjee A. Pothole detection and classification using 3D technology and watershed method // Journal of Computing in Civil Engineering. 2018. Vol. 32, No. 2. Article 04017078. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000726.
25. Bosurgi G., Modica M., Pellegrino O., Sollazzo G. An automatic pothole detection algorithm using pavement 3D data // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24. Article 2057978. DOI: 10.1080/10298436.2022.2057978.

Mathematical model of the local road pavement repair process using a construction 3D printer

Krotov O.M.
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

JEL classification: L61, L74, R53

The article considers a mathematical model of the local road pavement repair process using a road construction 3D printer. The proposed approach is based on digital determination of the defect geometry, calculation of the required volume of the bituminous mineral mixture, generation of the print head trajectory, metered layer-by-layer extrusion of the material and subsequent quality control of the restored surface. The developed model combines the description of the defect depth, the repair area, the layer formation process, the volume balance, the effect of compaction, the constraints on material flow rate and on the travel speed of the working tool, as well as an objective function of cost minimization. To account for the error of LiDAR scanner or camera data, a measurement error component of the defect depth is introduced into the model. A condition of complete defect filling is formulated, according to which the volume of the placed material after compaction must not be less than the volume of the damage, together with a criterion of uniformity of the restored surface expressed through the standard deviation of the final layer thickness. Technological constraints related to the extruder capacity, the print head travel speed and the reach zone of the manipulator are defined. It is shown that the use of additive technologies in local repair makes it possible to increase the accuracy of defect filling, reduce material overconsumption and diminish the influence of the human factor compared with the spray injection method. The model can serve as a basis for designing a road construction 3D printer, developing material feed control algorithms and a local repair procedure.

Keywords: local repair, road pavement, 3D printing, bituminous mineral mixture, mathematical model, extrusion, LiDAR, placement trajectory, quality control.

References

1. Jackson R.J., Wojcik A.B., Miodownik M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties // Materials & Design. 2018. Vol. 160. P. 468-474. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.030.
2. Cantisani G., D'Andrea A., Di Mascio P., Moretti L., Fiore N., Petrelli M., Polidori C., Venturini L. Materials study to implement a 3D printer system to repair road pavement potholes // Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 69. P. 91-98. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.149.
3. Gong F., Cheng X., Fang B., Cheng C., You Z. et al. Prospect of 3D printing technologies in maintenance of asphalt pavement cracks and potholes // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 397. Article 136551. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136551.
4. Gong F., Cheng X., Fang B. et al. A Review on the Application of 3D Printing Technology in Pavement Maintenance Engineering // Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 7. Article 6237. DOI: 10.3390/su15076237.
5. Kwon B.J., Kim D., Rhee S.K., Kim Y.R. Spray injection patching for pothole repair using 100 percent reclaimed asphalt pavement // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 166. P. 445-451. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.145.
6. Dong Q., Huang B., Zhao S. Field and laboratory evaluation of winter season pavement pothole patching materials // International Journal of Pavement Engineering. 2014. Vol. 15, No. 4. P. 279-289. DOI: 10.1080/10298436.2013.814772.
7. Hafezzadeh R., Autelitano F., Giuliani F. Asphalt-based cold patches for repairing road potholes: an overview // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 306. Article 124870. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124870.
8. Hafezzadeh R., Autelitano F., Giuliani F. Performance-related methods for the characterization of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Article e02600. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02600.
9. Wang T., Dra Y.A.S.S., Cai X., Cheng Z., Zhang D., Lin Y., Yu H. Advanced cold patching materials (CPMs) for asphalt pavement pothole rehabilitation: State of the art // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 366. Article 133001. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133001.
10. Li L., Huang Y., Shao Z., Ren D. An experimental investigation on the repairing performance and fatigue life of asphalt pavement potholes with an inclined interface joint // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 7. Article 597523. DOI: 10.3389/fmats.2020.597523.
11. Han S., Liu M., Shang W., Qi X., Zhang Z., Dong S. Timely and durable polymer modified patching materials for pothole repairs in low temperature and wet conditions // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 9. Article 1949. DOI: 10.3390/app9091949.
12. Buswell R.A., de Silva W.R.L., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. P. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
13. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. 2016. Vol. 11, No. 3. P. 209-225. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.
14. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. Vol. 45, No. 8. P. 1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
15. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42, No. 3. P. 558-566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
16. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 106. P. 103-116. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
17. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders // Materials & Design. 2016. Vol. 100. P. 102-109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097.
18. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 145. P. 639-647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
19. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. P. 477-490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144.
20. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
21. Ma N., Fan J., Wang W., Wu J., Jiang Y., Xie L., Fan R. Computer vision for road imaging and pothole detection: a state-of-the-art review of systems and algorithms // Transportation Safety and Environment. 2022. Vol. 4, No. 4. Article tdac026. DOI: 10.1093/tse/tdac026.
22. Chufarov I.V. Methods for detecting surface defects of products made of metals and their alloys using machine vision methods // Voprosy prirodopolzovaniya [Problems of Nature Management]. 2025. Vol. 4, No. 1. P. 61-64.
23. Fan R., Ozgunalp U., Wang Y., Liu M., Pitas I. Rethinking road surface 3-D reconstruction and pothole detection: From perspective transformation to disparity map segmentation // IEEE Transactions on Cybernetics. 2022. Vol. 52, No. 7. P. 5799-5808.
24. Tsai Y.-C., Chatterjee A. Pothole detection and classification using 3D technology and watershed method // Journal of Computing in Civil Engineering. 2018. Vol. 32, No. 2. Article 04017078. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000726.
25. Bosurgi G., Modica M., Pellegrino O., Sollazzo G. An automatic pothole detection algorithm using pavement 3D data // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24. Article 2057978. DOI: 10.1080/10298436.2022.2057978.