

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа
экономики» Факультет компьютерных наук

Исследовательский проект

Укладка паллеты коробками

Генеральный директор АО «ЦОСиВТ»,
Хельвас Александр Валериевич

Москва, 2025

Реферат

Целью данной курсовой является разработка алгоритма эффективной паллетизации складов, наполненных множеством коробок, имеющих свой размер. Актуальность данной исследования обуславливается достижением максимально компактного и приближенного к прямоугольной форме расположения грузов со склада в целях дальнейшей транспортировки, что позволит уменьшить затраты и сократить занимаемое пространство. В ходе исследования рассматриваются различные современные методы оптимизации данной задачи, включая эвристические, жадные и метаэвристические подходы. В результате данной работе мы получили прототип алгоритма, способного в автоматическом режиме генерировать план паллетизации, учитывая геометрические ограничения и готового к дальнейшему расширению за счет интеграции метаэвристик и дополнительных факторов и внедрения решения в глобальную систему управления складом.

Ключевые слова: паллетизация, алгоритм оптимизации, складская логистика, укладка коробок.

Глоссарий

Сцена — часть окружающего нас мира, которую необходимо запечатлеть на изображении.

JSON — текстовый формат для обмена и хранения данных.

API — программный интерфейс, то есть описание способов взаимодействия одной компьютерной программы с другими.

SDK — набор инструментов для разработки программного обеспечения, собранный в единый пакет.

Паллета — унифицированная платформа (EURO 1200 × 800 мм или FIN 1200 × 1000 мм), на которой размещаются коробки для складирования и транспортировки.

Паллетизация — процесс укладки единичных грузовых мест (коробок, ящиков) на паллету по определённом алгоритму.

SKU — (Stock Keeping Unit) — уникальный складской артикул товара, единица учета на складе.

Коэффициент заполнения — (*Fill Rate*) — отношение суммарного объёма всех размещённых коробок к объёму прямоугольного параллелепипеда, ограниченного паллетой и достигнутой высотой штабеля; выражается в процентах.

Свободный прямоугольник — (*free-rect*) — максимальная не занятая область текущего слоя, куда может быть помещена очередная коробка.

Слой — совокупность коробок с единообразной по высоте «плоскостью опоры», размещённых за один проход алгоритма.

Candidate Height — набор значений высоты потенциального слоя, формируемый из высот оставшихся коробок.

Best Area Fit — эвристика выбора позиции, минимизирующая неиспользованную площадь свободного прямоугольника.

Обозначения и сокращения

ПО — программное обеспечение.

FOV — область видимости.

FOS — область резкости.

DOF — глубина резкости.

GPU — графический процессор.

WMS — Warehouse Management System — складская информационная система.

GA — Genetic Algorithm — генетический алгоритм.

RL — Reinforcement Learning — обучение с подкреплением.

MIP — Mixed-Integer Programming — смешанные целочисленные модели.

CP — Constraint Programming — программирование ограничений.

GAPS — Greedy Algorithm for Pallet Stacking — жадный алгоритм укладки на паллету.

PBLS — Platform-Based Layered Strategy — стратегия послойной укладки на основе «платформ».

HAPS — Hybrid Algorithm for Pallet Stacking — гибридный алгоритм укладки на паллету.

LAPS — Layer-based Adaptive Packing Strategy — адаптивная послойная стратегия упаковки.

MAPS — Multi-Address Pallet Stacking — модуль адресного перераспределения коробок между паллетами.

3D-BPP — Three-Dimensional Bin Packing Problem — задача трехмерной упаковки в контейнеры.

FFD — First Fit Decreasing — алгоритм «Первый подходящий с убыванием», при котором объекты сначала сортируются от большего к меньшему.

PA — Packing Algorithm — Алгоритм упаковки.

VU — Volume Utilization — Коэффициент использования объема.

BL — Bottom-Left — эвристика «Нижний-Левый», стратегия размещения объекта в самую нижнюю и самую левую доступную позицию.

1 Постановка задачи

Три основные задачи решаемые в рамках проекта:

1.1 Укладка множества коробок в паллету

Необходимо разместить все коробки из множество S без взаимных пересечений, максимизируя коэффициент заполнения и одновременно соблюдая ограничения по устойчивости.

1.2 Укладка множества коробок в несколько паллет

Часто происходят ситуации, когда груз поступает партиями разных адресов, поэтому необходимо разбить исходный массив на подмножества по адресу доставки и для каждого решить подзадачу укладки, минимизируя дисперсию высот, полученных паллет.

1.3 Укладка множества коробок в одну или несколько паллет с учетом параметра Islay описывающего группы товаров по секциям в магазинах

При укладке паллеты необходимо ввести поощрения за компактное размещение товаров одной группы внутри паллеты.

3 Формальная постановка задач

3.1 Общие обозначения и входной формат

Задача паллетизации представляет собой целое семейство задач на укладку паллет.

Фактически задача сводится к укладке прямоугольных коробок на прямоугольный поддон (паллетту).

Дана паллета с известным размером $W \times L$ и набор S K коробок с заданными размерами $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\} = \{(w_1, l_1, h_1), (w_2, l_2, h_2), \dots, (w_K, l_K, h_K)\}$.

В качестве дополнительных параметров коробок могут использоваться масса коробок m_k и "цвет" c_k .

Исходный массив имеет вид

$\{\text{SKU}, \text{Quantity}, \text{Length}, \text{Width}, \text{Height}, \text{Weight}, \text{Strength}, \text{Aisle}, \text{Caustic}\}$

Здесь

- SKU - код позиции товара,
- Quantity - количество коробок данного типа,
- Length - длина коробки в мм,
- Width - ширина коробки в мм,
- Height - высота коробки в мм,
- Weight - вес коробки в мм,
- Strength - прочность коробки (не используется),
- Aisle - тип содержимого (соответствует color в нашей постановке),
- Caustic - "цвет который в рамках текущей работы не используется"

Необходимо выполнить укладку коробок на паллету с выполнением ряда требований.

Каждый упакованный блок характеризуется двумя координатами: $\langle x_1, y_1, z_1 \rangle$ и $\langle x_2, y_2, z_2 \rangle$, где первыми записаны координаты нижнего левого угла (наиболее близкого к началу координат $\langle 0, 0, 0 \rangle$), а вторыми – координаты с наибольшими значениями. Таким образом, решение задачи имеет вид $S = s_i = (\langle x_1^i, y_1^i, z_1^i \rangle, \langle x_2^i, y_2^i, z_2^i \rangle) | i = 1, 2, \dots, K$.

Результат описывается в виде массива данных:

```

H_total Percolation W_total
SKU_i  x_1^i y_1^i z_1^i  x_2^i y_2^i ,z_2^i Aisle Weight
...

```

Здесь:

H_{total} - полная высота паллеты с коробками;

$$Percolation = \frac{\sum_{i=1}^K w_i}{W \times L \times H}$$

- плотность упаковки (принимает значение от 0 до 1). W_{total} - полный вес паллеты;

SKU_i - код коробки во входном массиве;

x_1^i, y_1^i, z_1^i - координаты угла O_i ;

x_2^i, y_2^i, z_2^i - координаты угла, противоположного O_i ;

Порядок следования записей должен соответствовать последовательности укладки коробок в паллету.

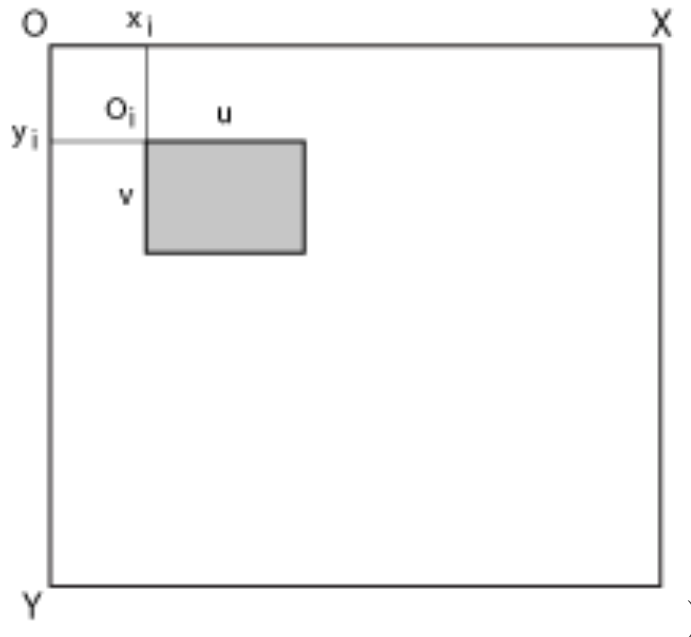


Рисунок 3.1 — Описание укладки

Пример входного и выходного файла

Входной файл COS-TEST-1-in.txt:

SKU,Quantity,Length,Width,Height,Weight,Strength,Aisle,Caustic
900001,6,600,400,200,12000,4,1,0,
900002,5,200,400,200,5000,4,2,0,

Выходной файл COS-TEST-1-out.txt:

2
400 1.00 97000
SKU_i,x_1^i,y_1^i,z_1^i,x_2^i,y_2^i,z_2^i,Aisle,Weight
900001,0,0,0,600,400,200,1,12000,
900001,800,0,0,1200,600,200,1,12000,
900002,600,0,0,800,400,200,2,5000,
900002,0,400,0,200,800,200,2,5000,
900002,200,400,0,400,800,200,2,5000,
900002,400,400,0,600,800,200,2,5000,
900002,800,600,0,1200,800,200,2,5000,
900001,0,0,200,600,400,400,1,12000,
900001,600,0,200,1200,400,400,1,12000,
900001,0,400,200,600,800,400,1,12000,
900001,600,400,200,1200,800,400,1,12000,

3.2 Распределение коробок между паллетами адресной доставки

Дополнительные входные данные

Для каждого адреса a известен *фиксированный* набор паллет $\mathcal{B}_a = \{P_{a,1}, \dots, P_{a,N_a}\}$ одинакового основания $W \times L$, в каждом из которых находится список коробок, связанных с ними.

Требуется

- а) Каждую коробку s_k , находящуюся в списках $P_{a_k,j} \in \mathcal{B}_{a_k}$ поместить строго на одну из паллет $P_{a_k,j} \in \mathcal{B}_{a_k}$.
- б) Соблюсти для каждой паллеты все геометрические.
- в) Стремиться к равномерной загрузке паллет одного адреса:
 - минимизировать разброс по итоговым высотам паллет;

— повысить *Percolation* в пределах заданного множества паллет.

Выходные данные

Файл или набор файлов в том же формате, что и для Задачи 1. Если паллет несколько, их содержимое выводится последовательно; допустимо дублировать строку-заголовок `SKU_i` . . . перед каждой новой паллетой либо группировать все записи в один список, сохраняя порядок фактической укладки.

Приложение А План работ

Описание проекта:

Цель проекта: Разработка ПО для минимизации высоты укладки 3D-грузов на паллету с помощью гибридного алгоритма (имитация отжига + жадная эвристика).

Мотивация проекта (почему выбрали именно этот проект?): Для меня представляет интерес решение нетривиальной задачи по упаковке и реализация алгоритма с его визуализацией.

Объект исследования: Процесс укладки разногабаритных коробок на стандартную грузовую паллету.

Предмет исследования: Алгоритмы решения задачи трехмерной упаковки (3D Bin Packing) и методы их оптимизации.

Предполагается, что комбинирование метода имитации отжига (для поиска порядка) и жадного алгоритма (для размещения) позволит уменьшить итоговую высоту укладки по сравнению с простыми эвристиками.

Задача относится к классу комбинаторной оптимизации (3D-BPP). Точные методы решения требуют огромных вычислительных мощностей. Современный подход заключается в использовании гибридных алгоритмов, балансирующих между скоростью работы и качеством укладки.