

物流倉庫における デジタルツイン量子最適化

名古屋大学 未来社会創造機構

河口 信夫



NAGOYA
UNIVERSITY



TMI



自己紹介：河口 信夫（かわぐち のぶお）

Graduate Program for Lifestyle Revolution based on Transdisciplinary Mobility Innovation

名古屋大学 **工学**研究科 情報・通信工学専攻 教授
(未来社会創造機構 モビリティ社会研究所 副所長)



TMI (超学際移動イノベーション) 卓越大学院 コーディネータ



自動運転ベンチャー (株)ティアフォー フェロー



NPO法人**位置情報サービス**研究機構(Lisra) 代表理事



WIDEプロジェクトメンバ (元ボードメンバ)

・研究テーマ：ユビキタス・コンピューティング

成果の例：

- ・カウントダウン時刻表アプリ「駅.Locky」 (300万人が利用)
- ・需給交換プラットフォーム/社会活動OS **Synerex**



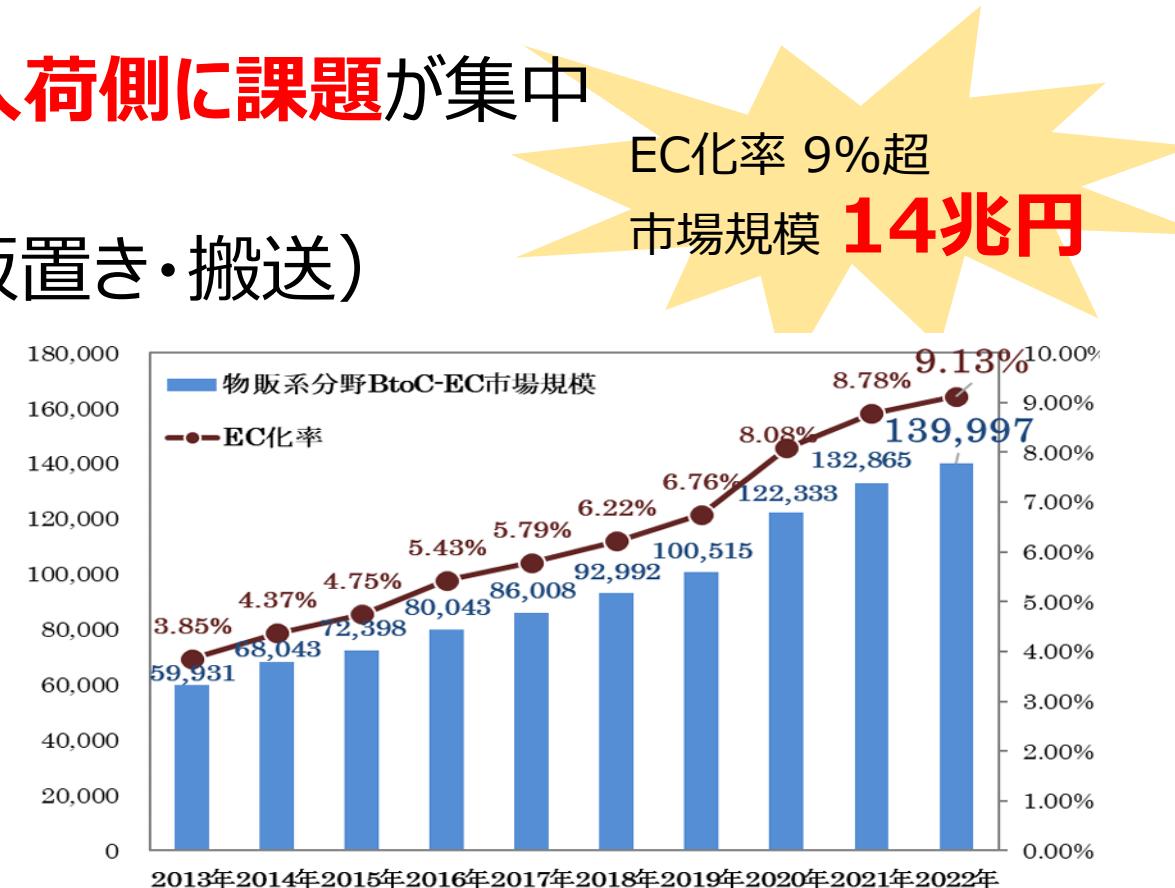
駅.Locky



社会課題・事業課題：人手不足と最適化の難しさ

- 物流現場における**慢性的人手不足**（通販の普及）
 - 2024年問題（働き方改革関連法の施行）
- 自動化倉庫（出荷側）が進む中、**入荷側に課題**が集中
- **経験・勘に頼る庫内作業**（検品・仮置き・搬送）
 - 庫内レイアウトも、何度も変更
- 作業量とシフトの対応づけも不十分

物流クライシス

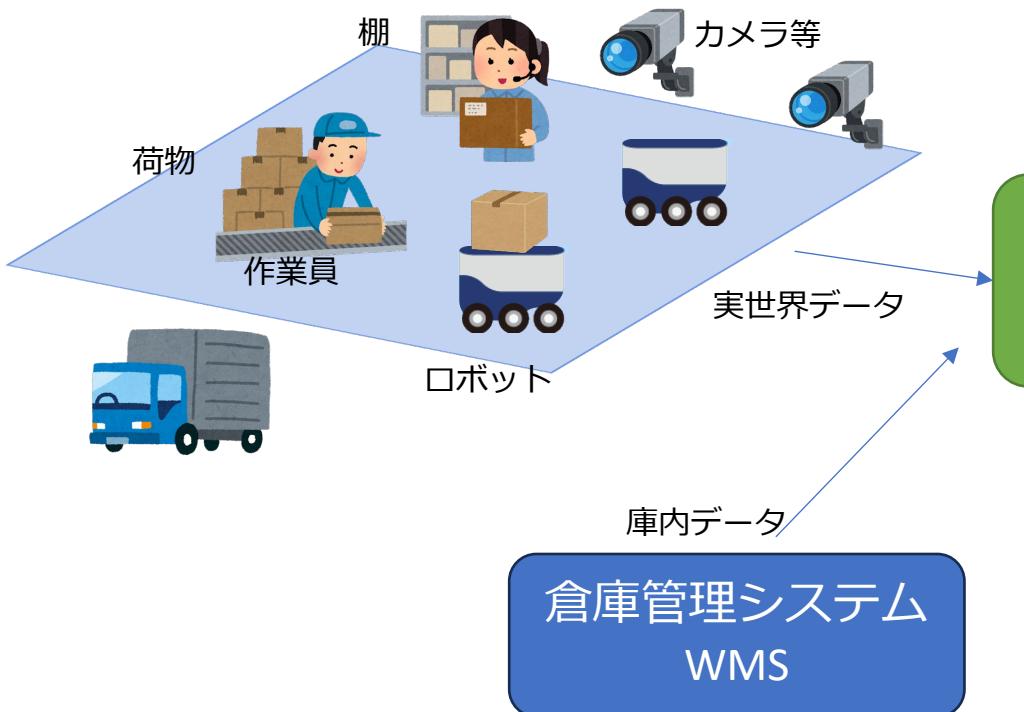


出展：令和4年度電子商取引に関する市場調査（経済産業省）

デジタルツイン 研究開発コンセプト

2つの方向からのアプローチ

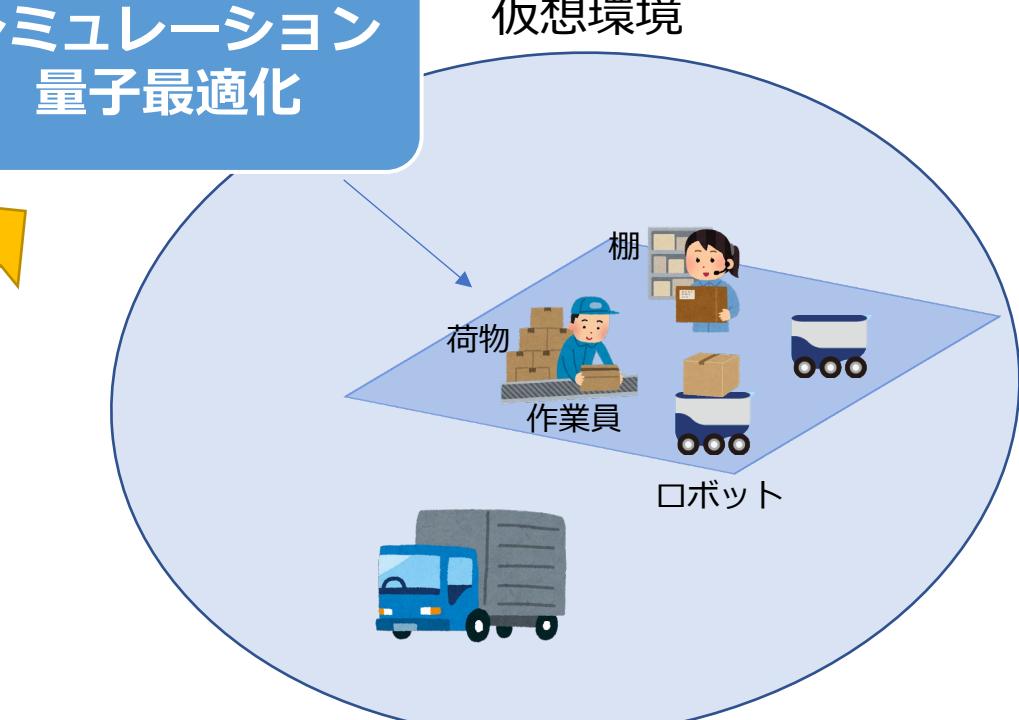
- ・実世界のデジタル化
- ・シミュレーション・最適化環境構築



デジタル
ツイン化

デジタル化
(可視化)

シミュレーション
量子最適化



シミュレーション基盤は、
エージェントベースで構築

出入庫フロアのセンシング

- ・センサとして、カメラを選定
 - ・様々な事象を広くとらえることが可能 (だが、俯瞰視点だと死角が発生)

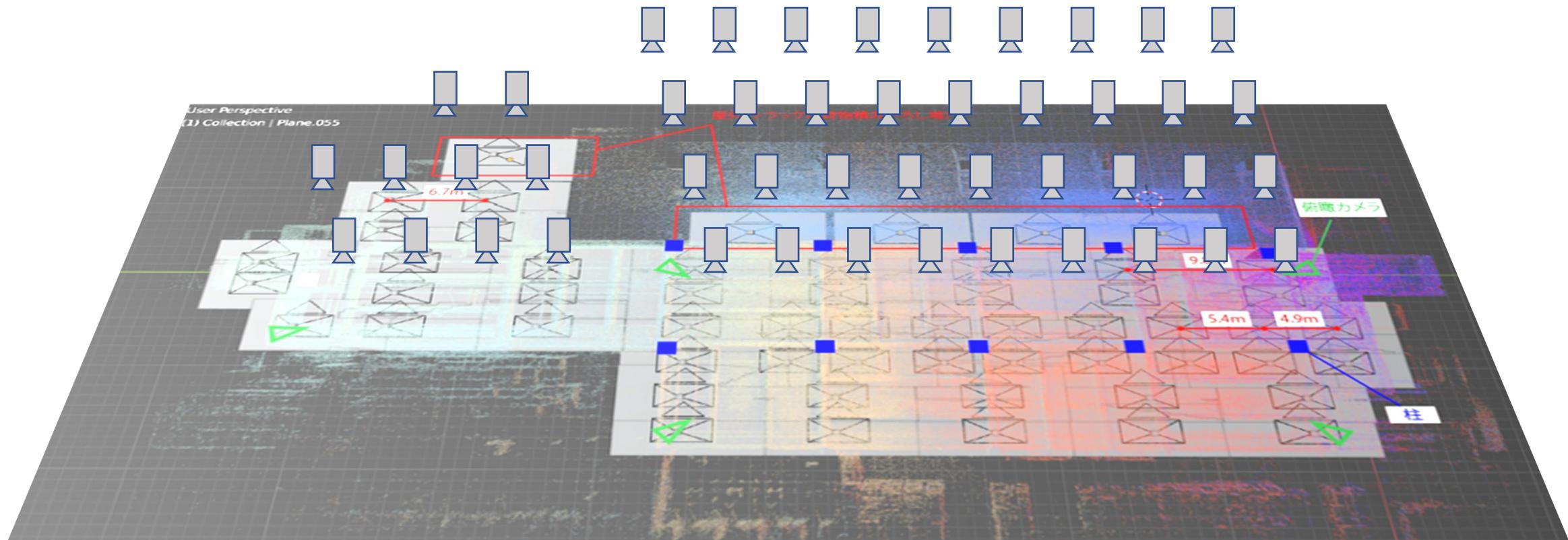


この入庫エリアだけで
30m × 50m の広さ

誰も
全体の状況を
把握できない

大規模カメラ基盤の設置

- ・大量のカメラ（86台）を天井/各フロアに設置
- ・カメラデータを統合して利用すると、上空からの視点が可能
- ・毎日 1.3 TB超 の映像データを記録



ファイル

新規

+

開く

Image Item

pos_x : —

pos_y : —

pos_z : —

rotate_x : —

rotate_y : —

rotate_z : —

size : —

trim_top : —

trim_bottom : —

trim_left : —

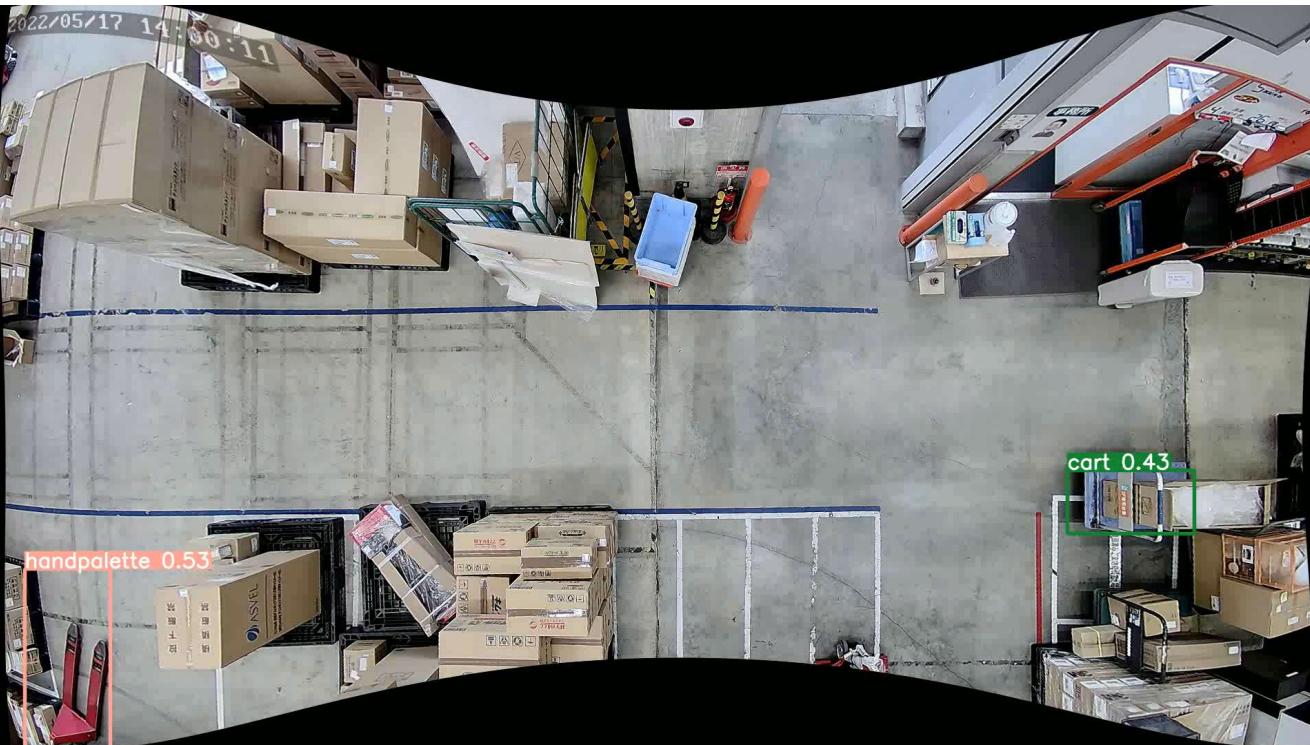
trim_right : —

手



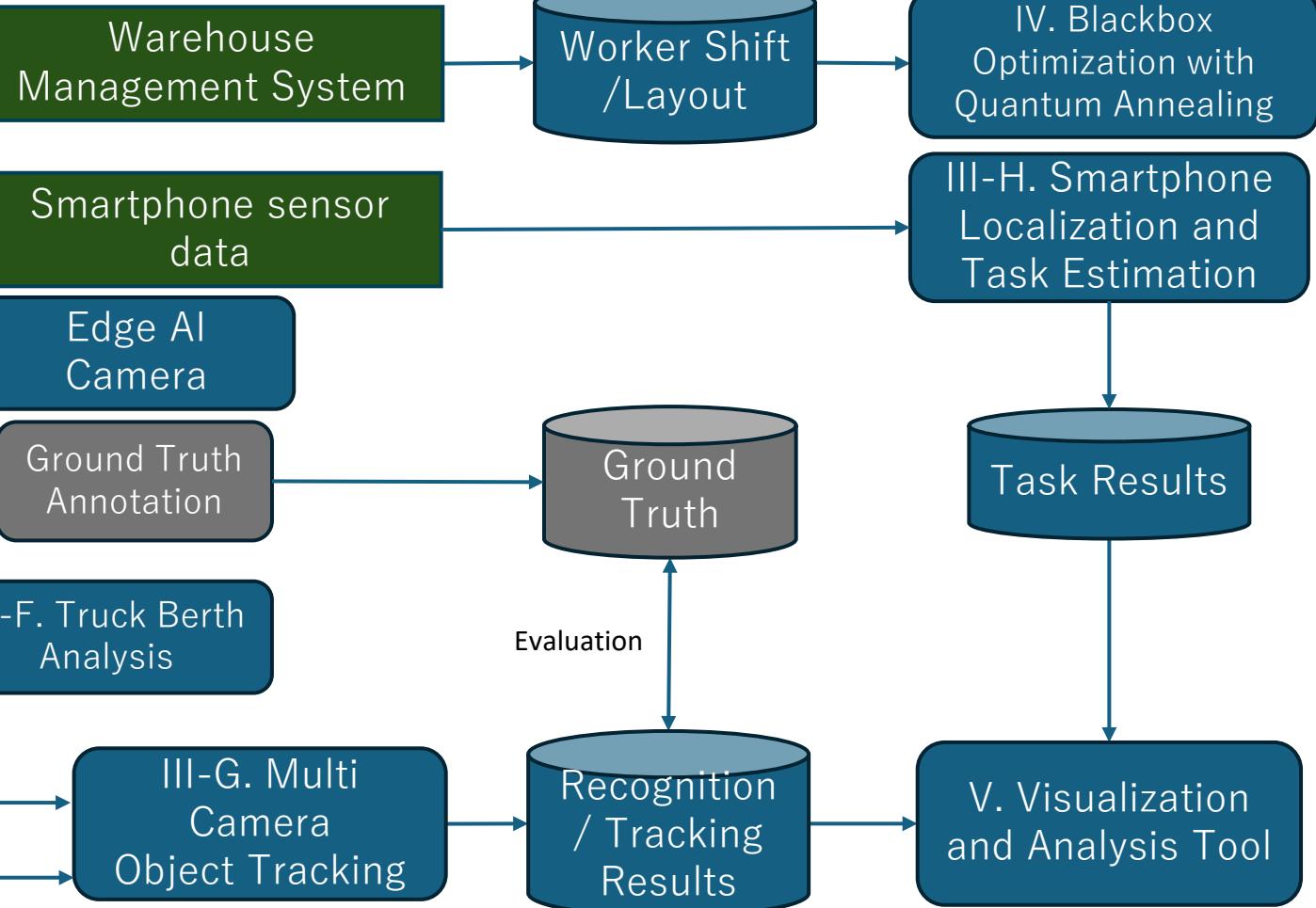
実世界(カメラ)情報のデジタル化

- ・近年のAI技術の発展により、きわめて手軽に利用可能に。。。
- ・しかし、俯瞰（真上からの）映像を扱うことは、不得意
⇒ 独自の**AIモデル**の構築が必要に（さらにマルチカメラ）



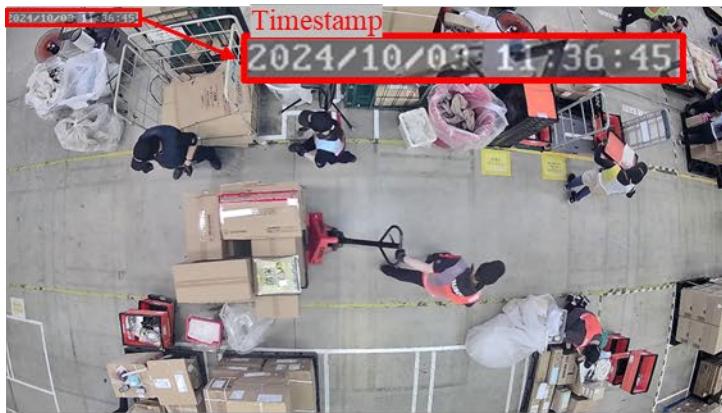
デジタル化手法全体

III-A. Camera Array Platform

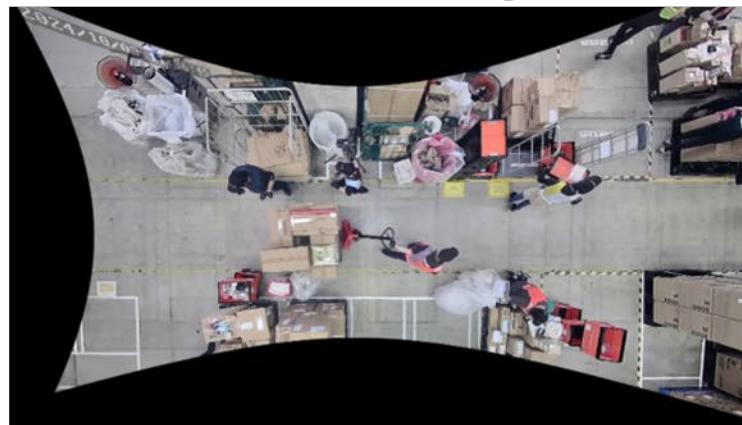


カメラの歪構成とステッチング

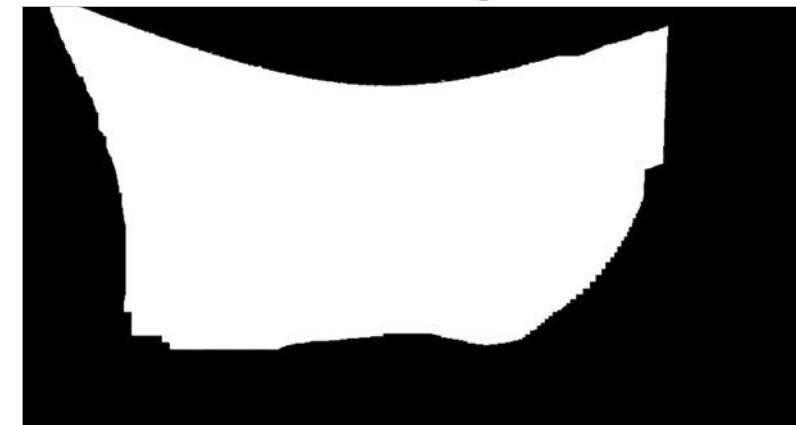
Original camera image (A2)



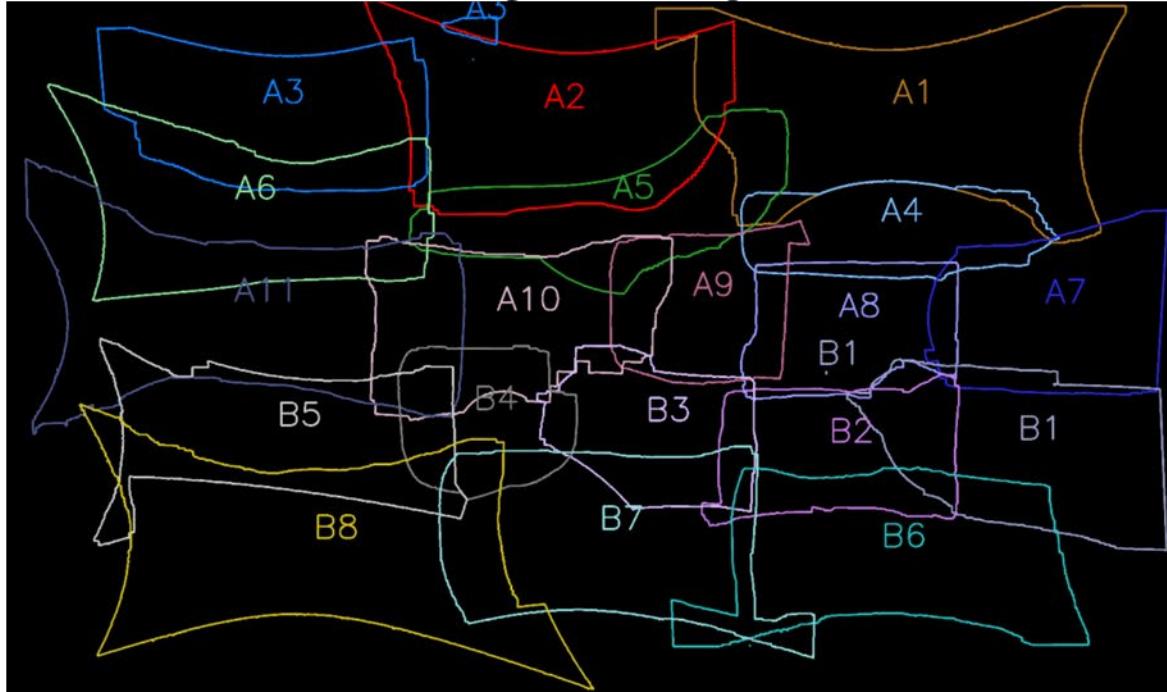
Undistorted image



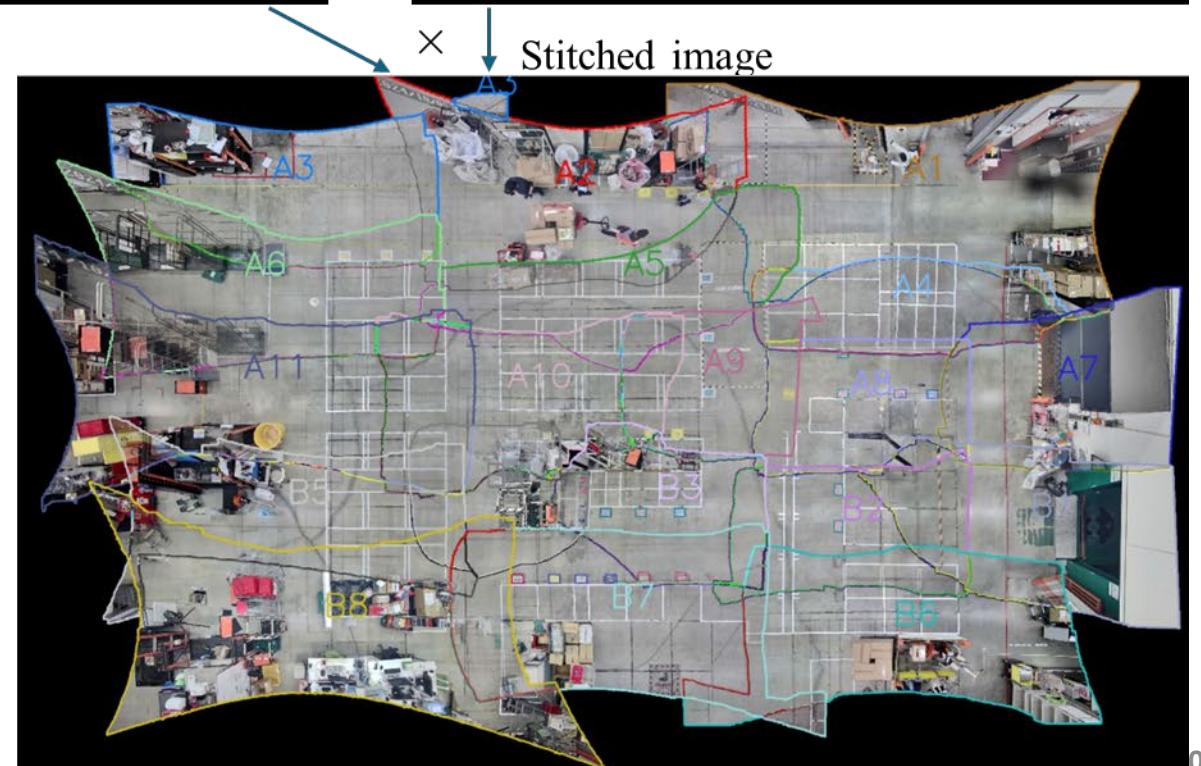
Mask image



Camera registration map

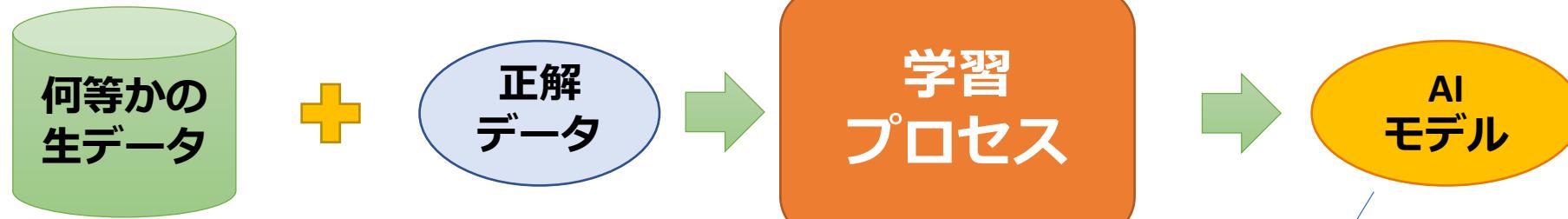


Stitched image

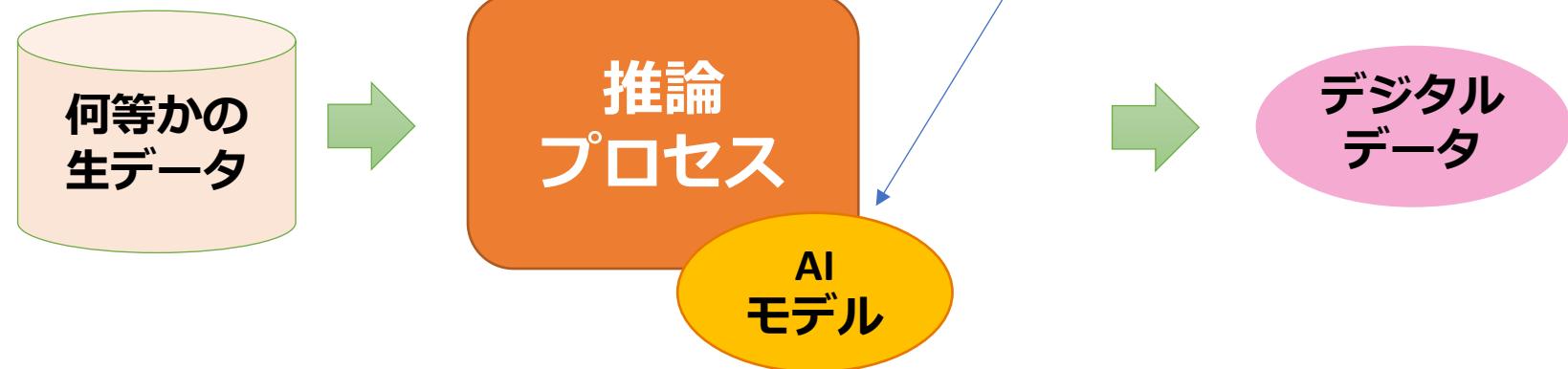


AIモデルの構築

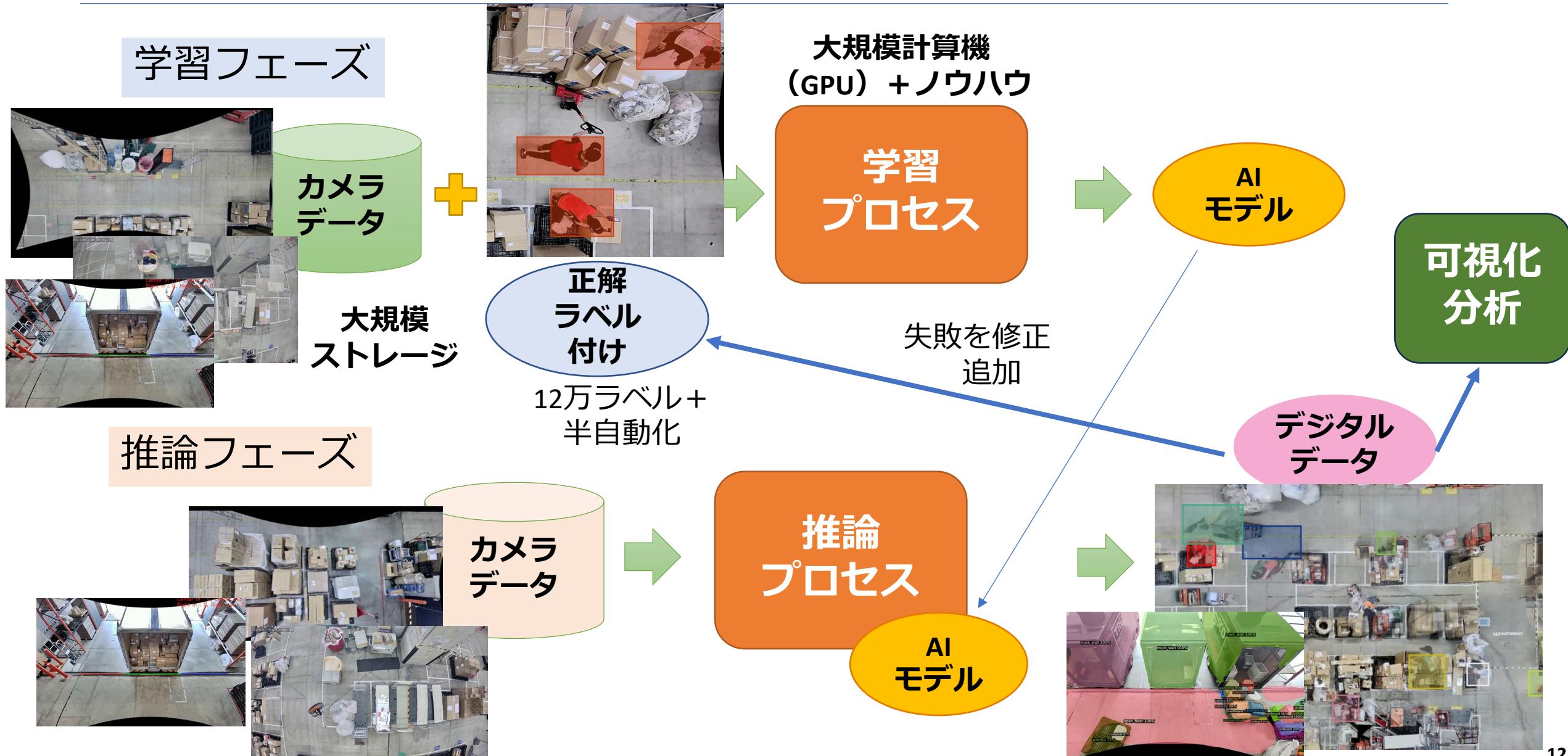
学習フェーズ

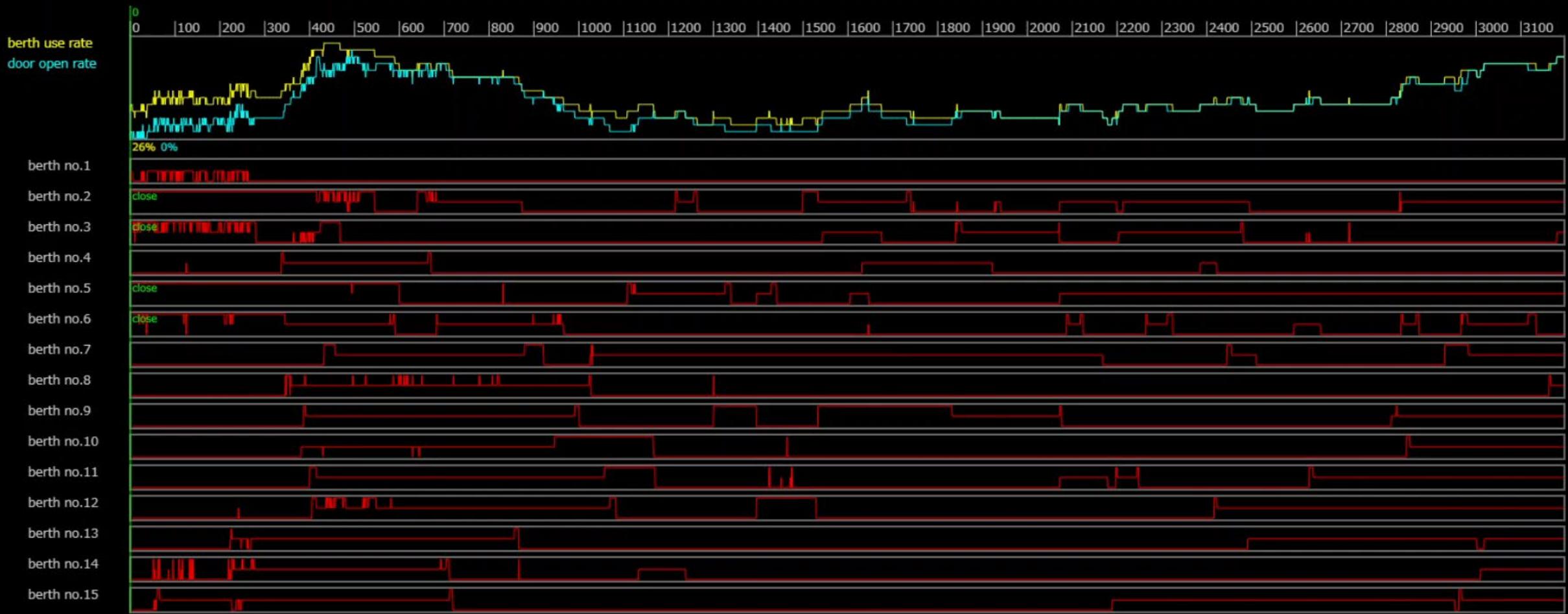
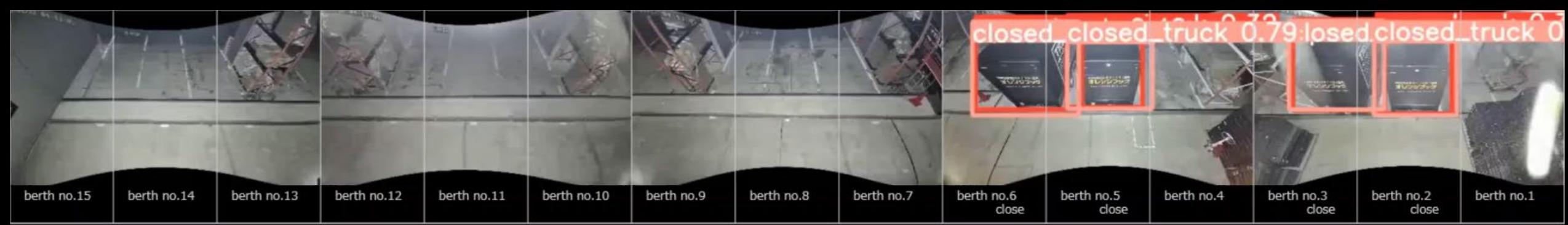


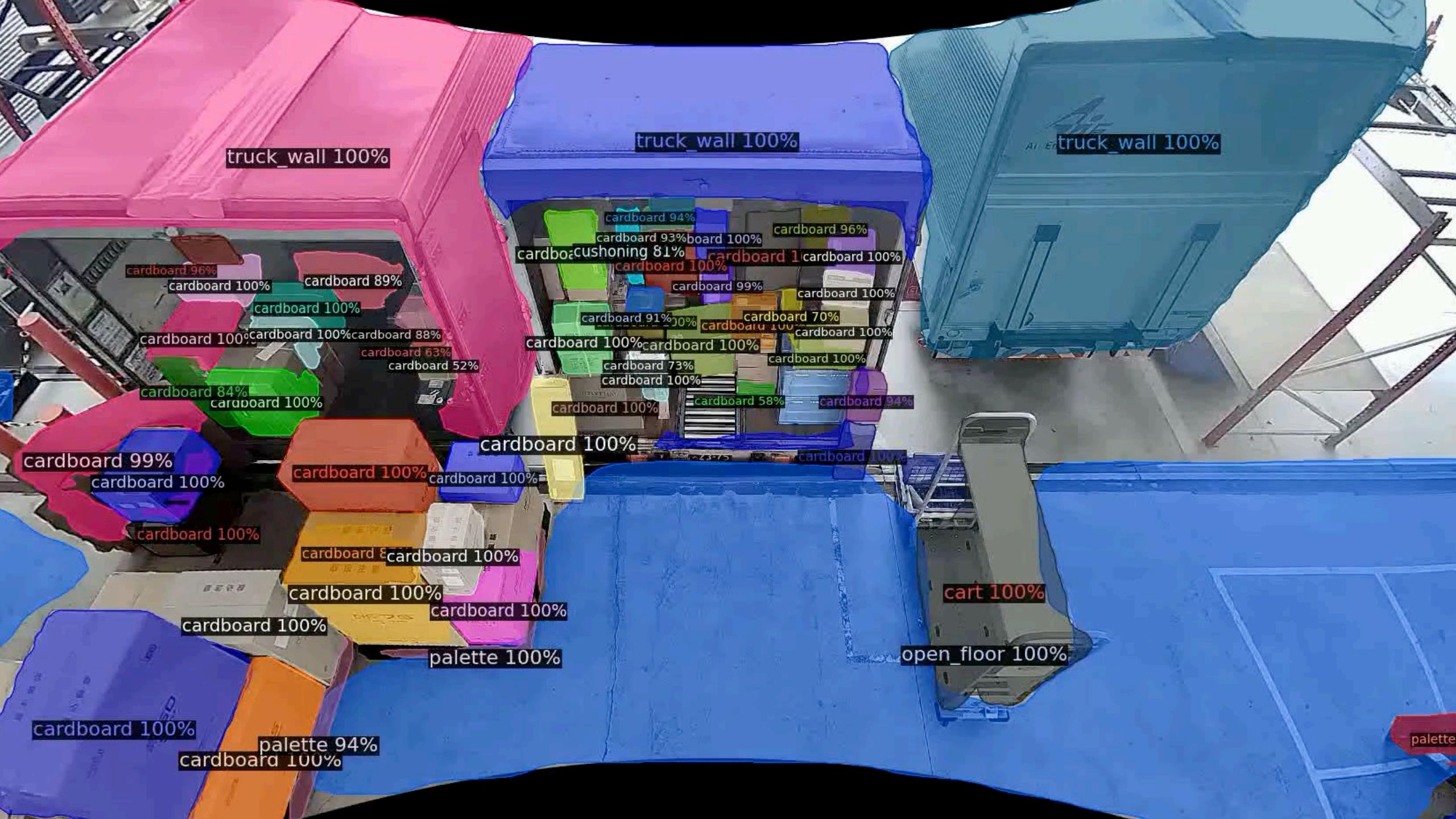
推論フェーズ



物流倉庫のデジタルツイン構築







バース内オブジェクトのデータセット作成

バースでは多種多様なオブジェクトが存在
既存のデータセットでは不十分

データセット作成

- ・バース内のオブジェクトを14クラスに分類
- ・ポリゴン形式でオブジェクトの輪郭線情報を付与
- ・画像2035枚に193357件のアノテーションを実施



floor



truck_wall



worker



pallet



container



cardboard



cushoning



road_cone



cage_trolley



flat_trolley



handpallet



packed_cart



cart



packed_container

修士論文発表会

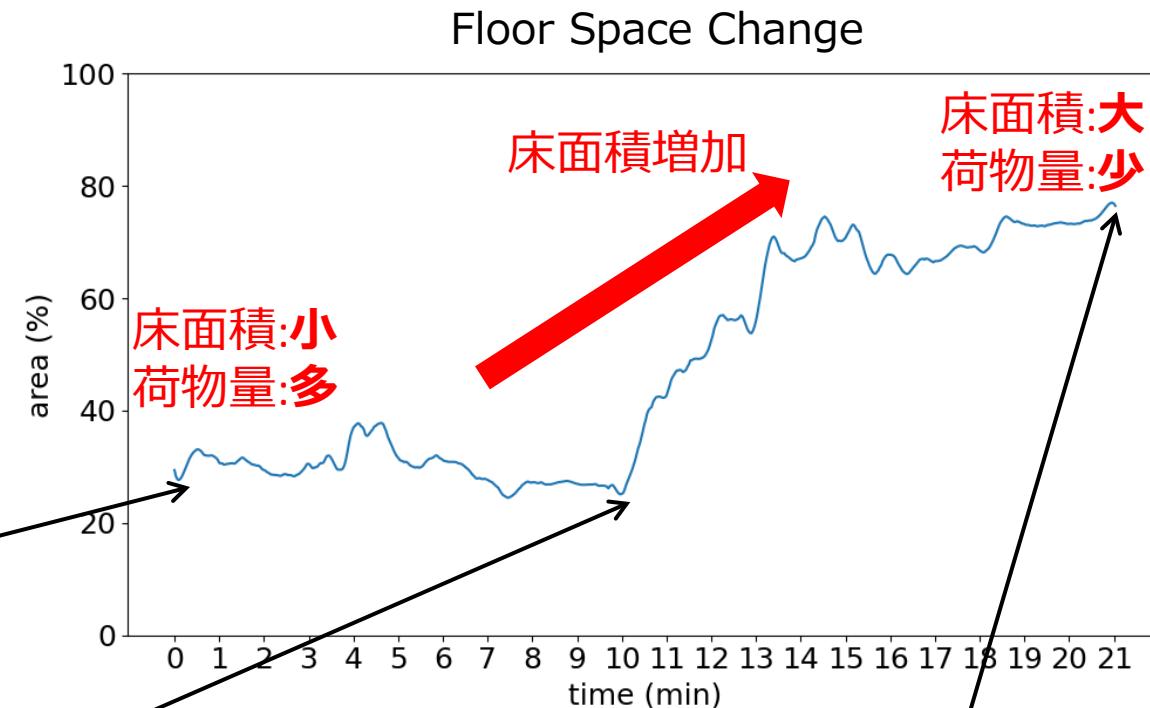
2025/11/23

クラス名	Train	Test	Total
cardboard	92499	24376	116875
palette	31527	7928	39455
container	15389	3371	18760
worker	2435	574	3009
truck_wall	2229	532	2761
cart	2011	512	2523
open_floor	1628	407	2035
cushoning	1602	422	2024
cage_trolley	1304	285	1589
pack_container	1128	280	1408
handpalette	888	242	1130
pack_cart	699	115	814
road_cones	408	87	495
flat_trolley	402	77	479

荷物量の算出

床面積から荷物量を算出

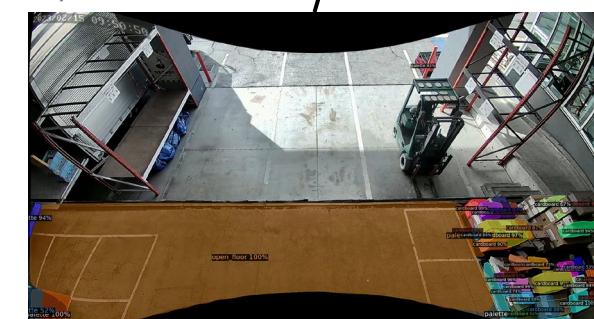
- 床面積の推移から荷物量推移を算出
- 横軸:経過時間(min)
- 縦軸:床面積の空き(%)
 - 100%は完全に空いている状態
 - 0は空きがない状態



time = 0(min)

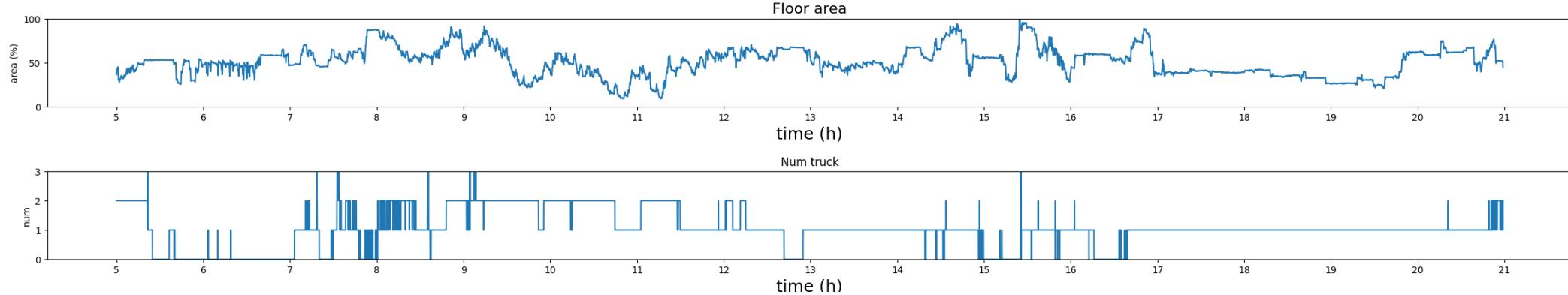


time = 13(min)

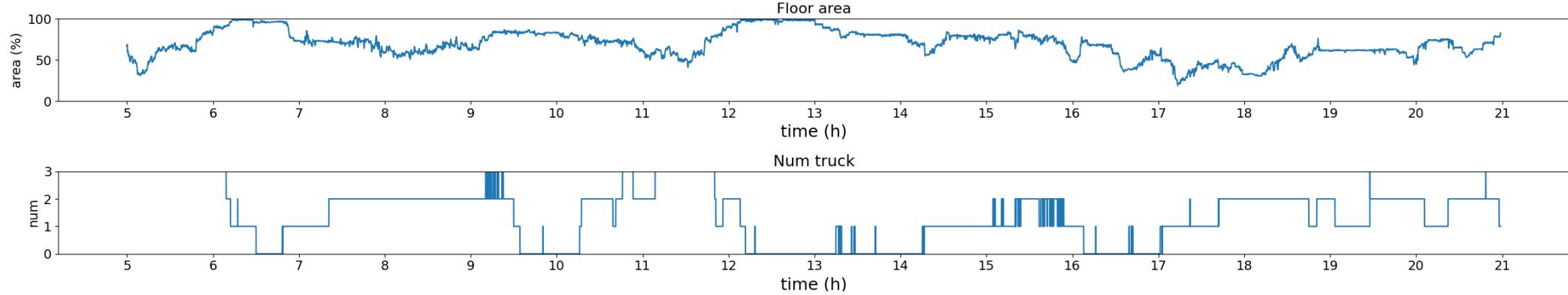


time = 21(min)

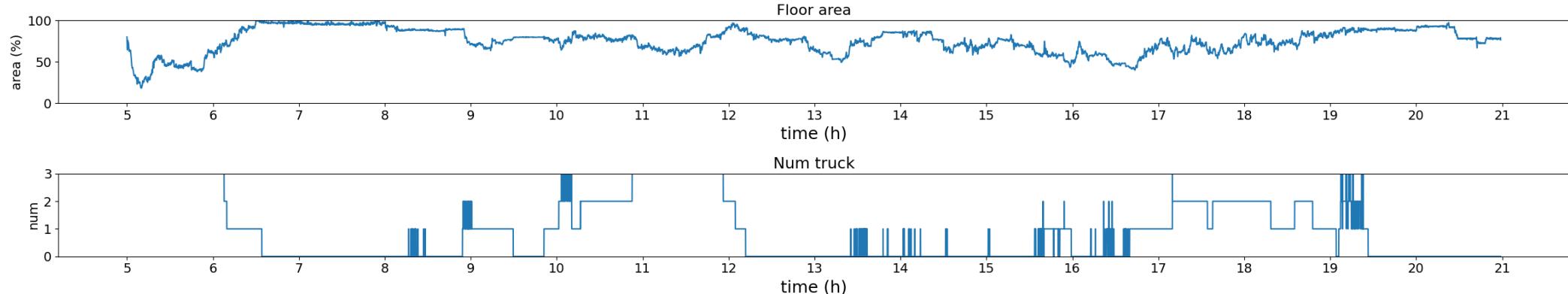
20230222Out_G1



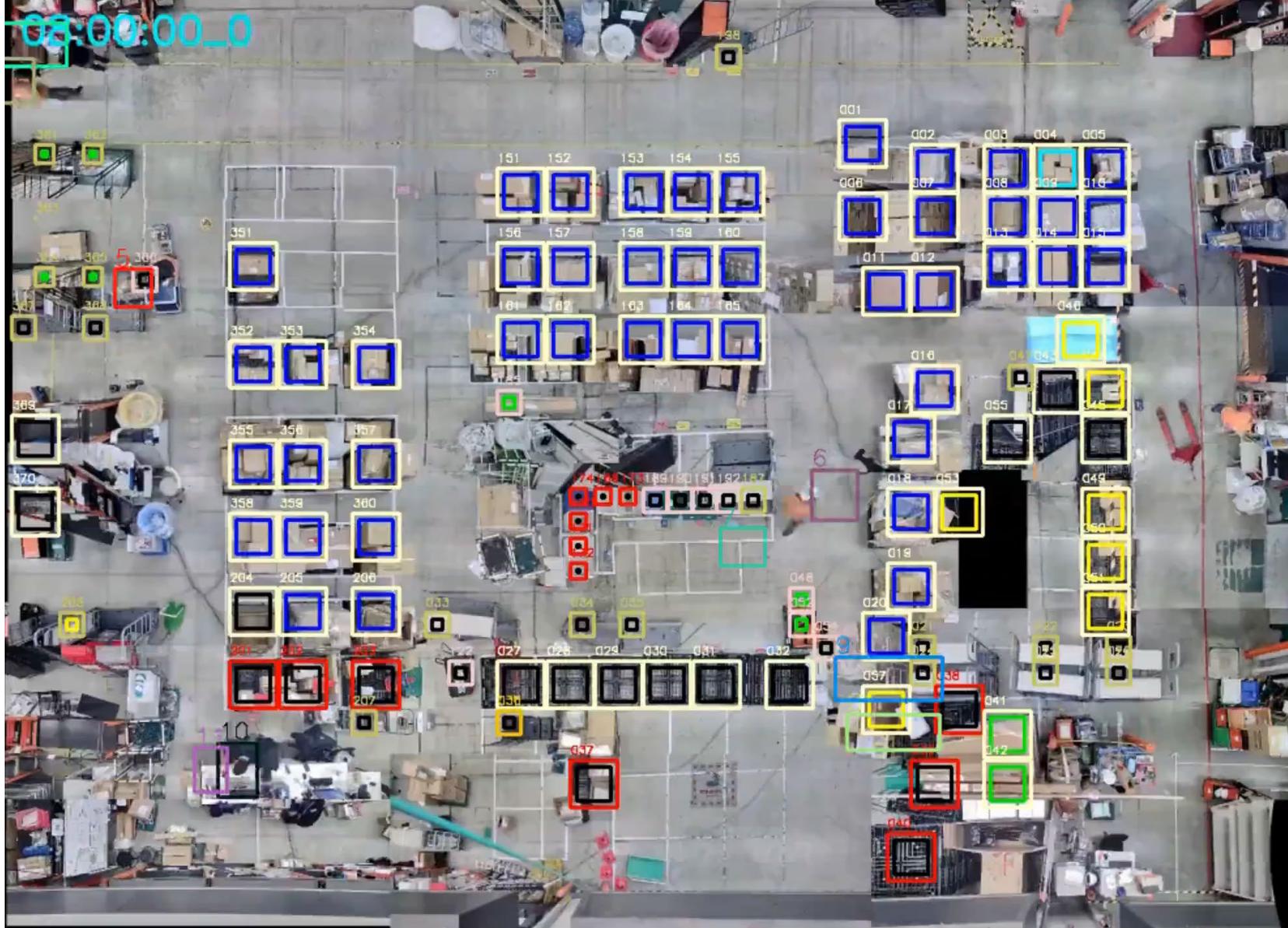
20230222Out_G3



20230222Out_G4



デジタル化の途中状況



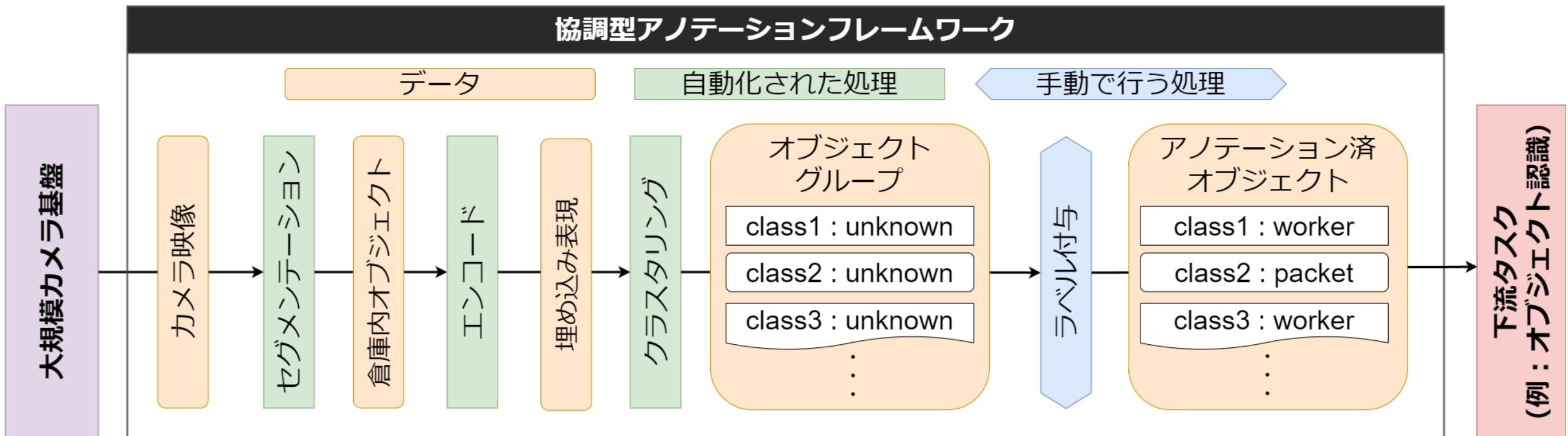
2023年12月に取得した 動画をデータ化

荷物の位置・ステータスの正解データも同時に表示

1時間分のタグづけに
60時間必要でした。。。

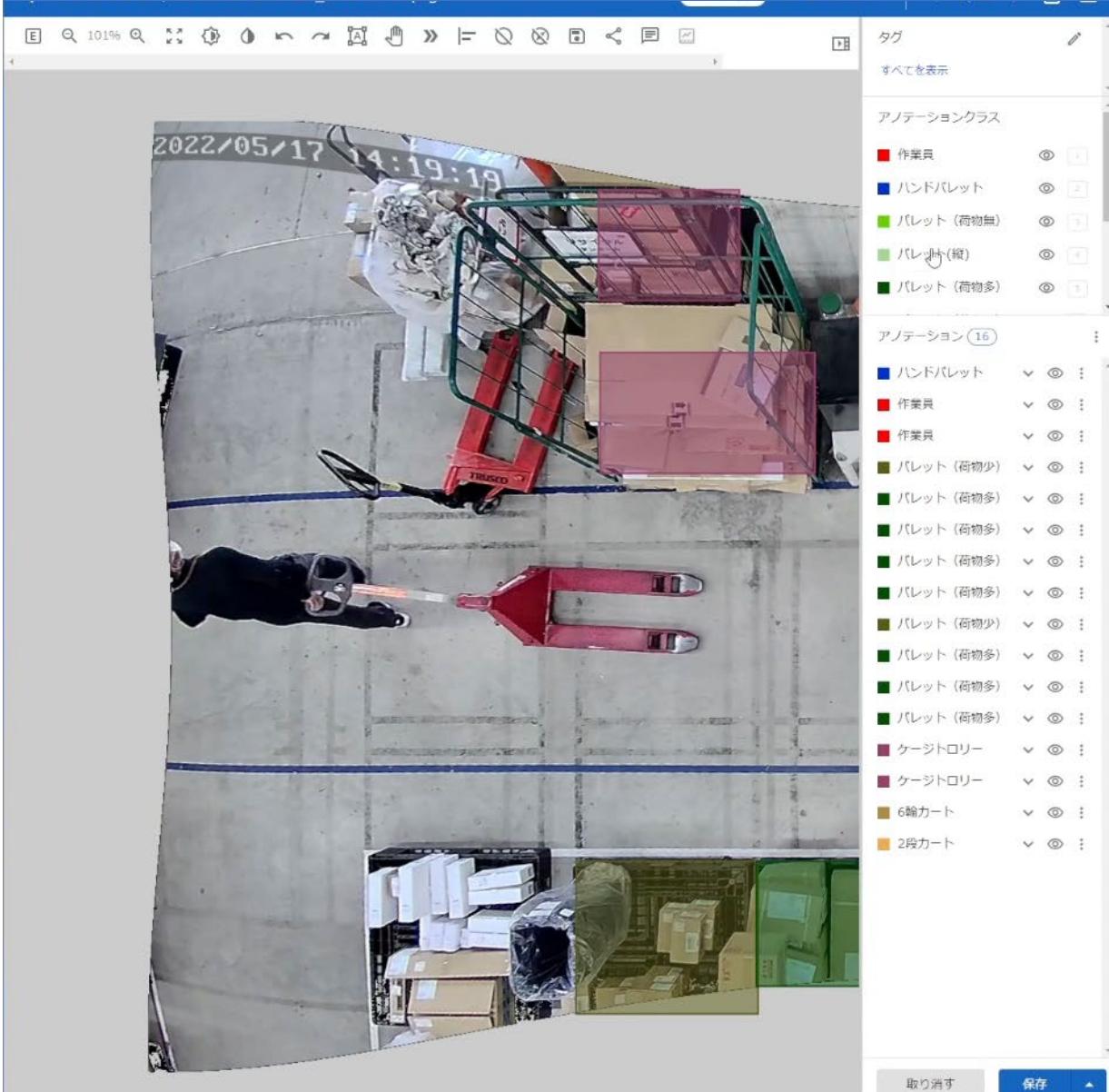
アノテーション（AIモデル作成）効率化

- AIモデルを構築するには、学習のためのアノテーションが必須（物流倉庫は、一般的なモデルでは認識率が不十分）
- 完全自动は困難なので、半自動（協調型）を構築



アノテーション方式の比較

手動のアノテーション



協調型アノテーション

Class ID: 10 - Class Name: unknown



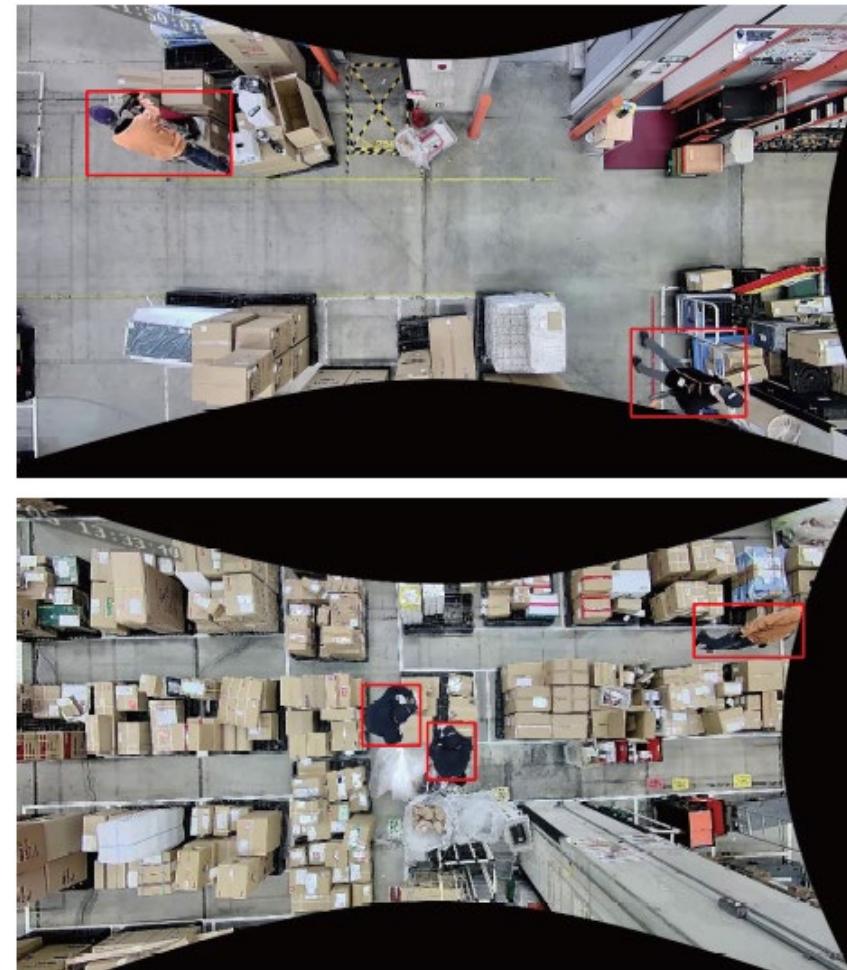
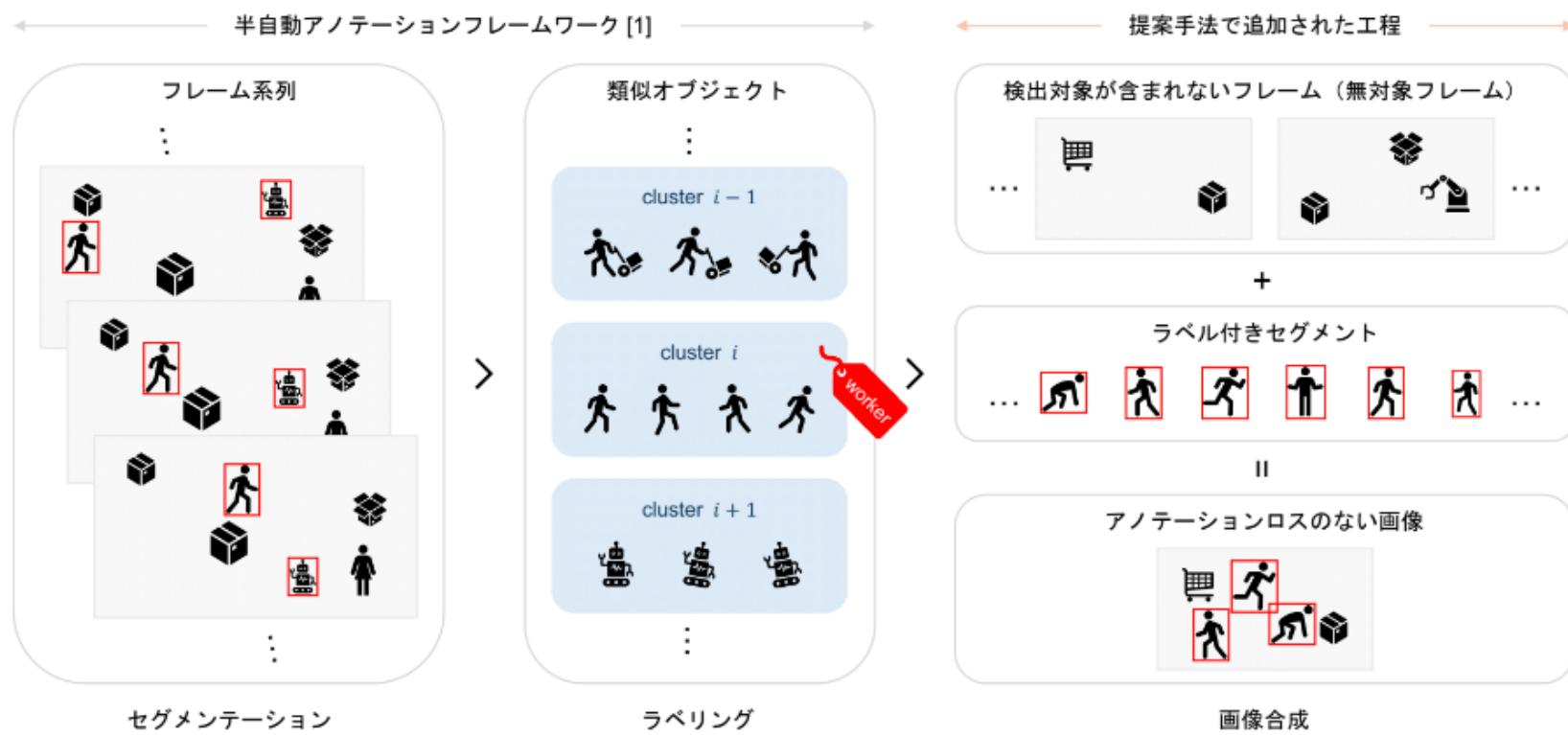
協調型アノテーションの有効性

- ・様々なオブジェクトに対しても有効性を確認



さらに、AIモデル作成向上のために

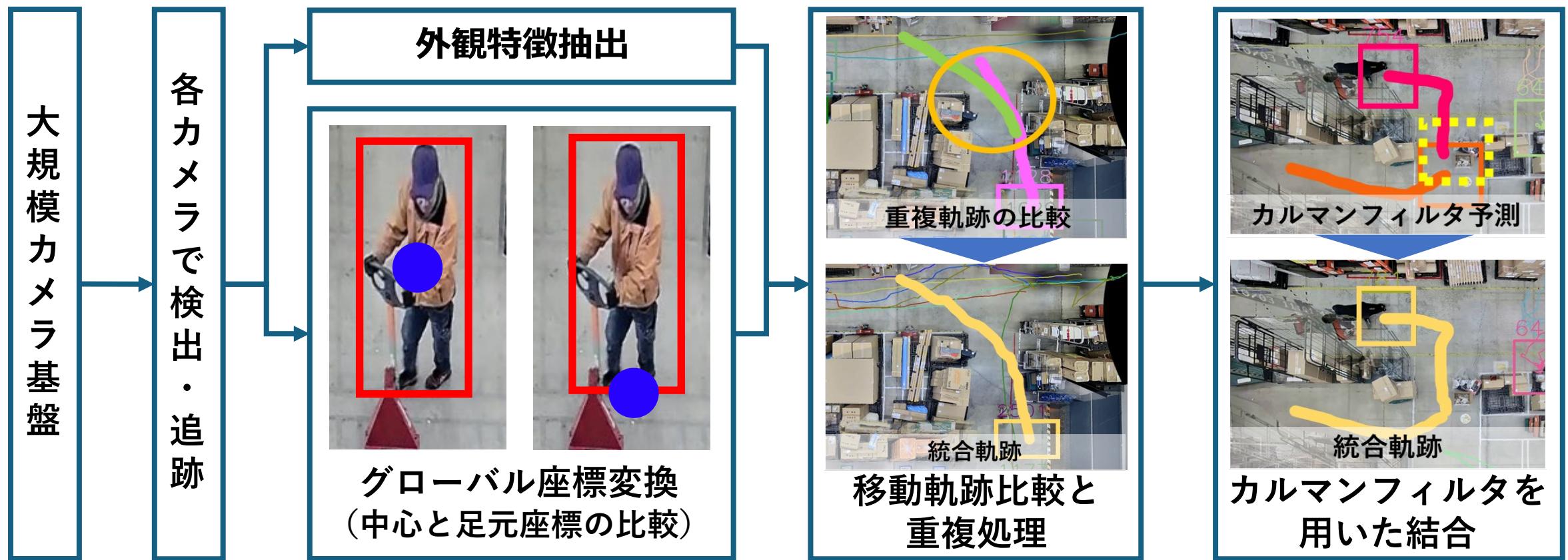
- 半自動で作成した「ラベル付き」オブジェクトを合成して、**新しい学習画像を生成**



UbiComp2024 Workshop 採択

外観特徴を用いたトラッキング

各カメラ検出した結果を統合し、作業員を高精度にトラッキングする





CorVS: ビデオとセンサの統合によるID推定

Identification method based on

IPIN2025

Correspondence between Video trajectories and Sensors



Multi-camera video trajectories

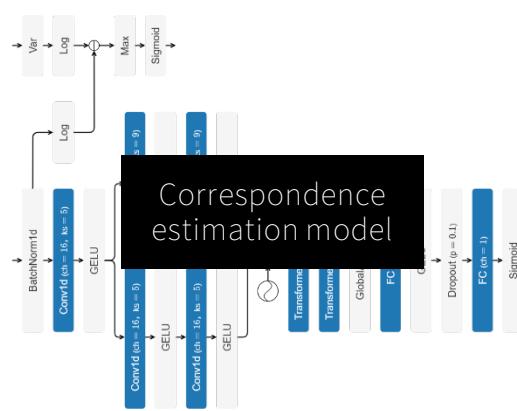
Trajectory features

For every
combo

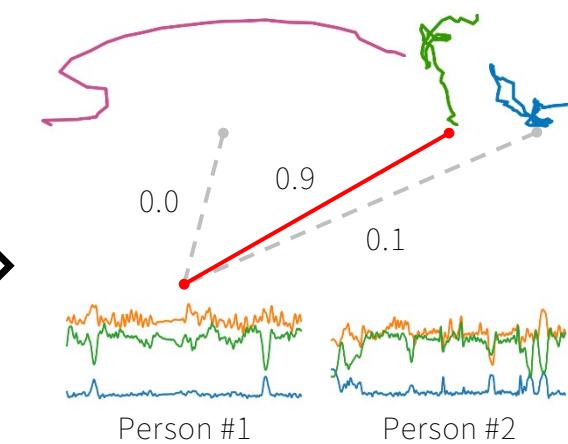


Wearable sensor
measurements

Measurements



Predict correspondence
probability & reliability



Match pairs based on
predicted correspondence



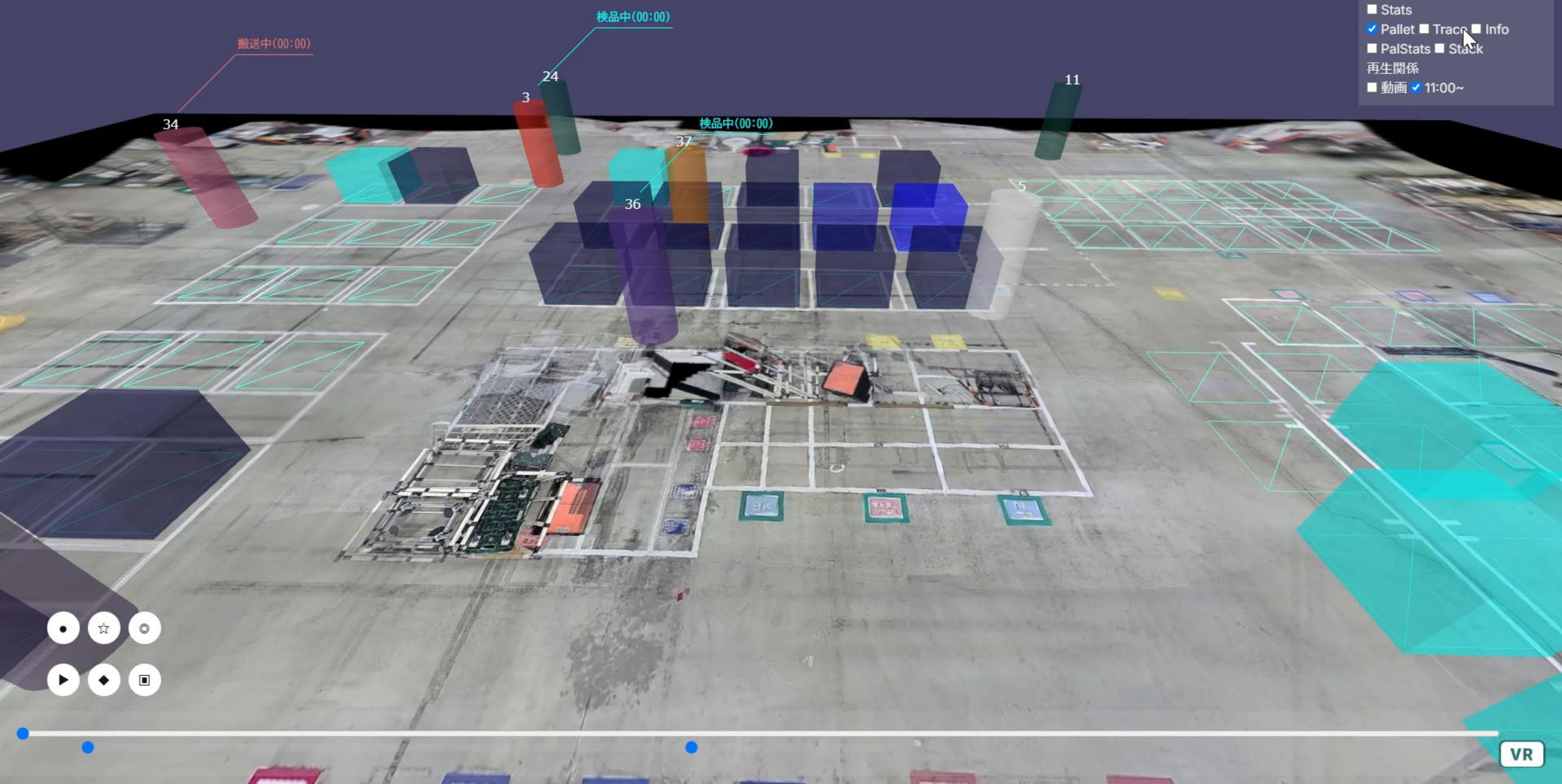
Location data with ID !

ID推定の結果

2024-10-03 11:30:51.2

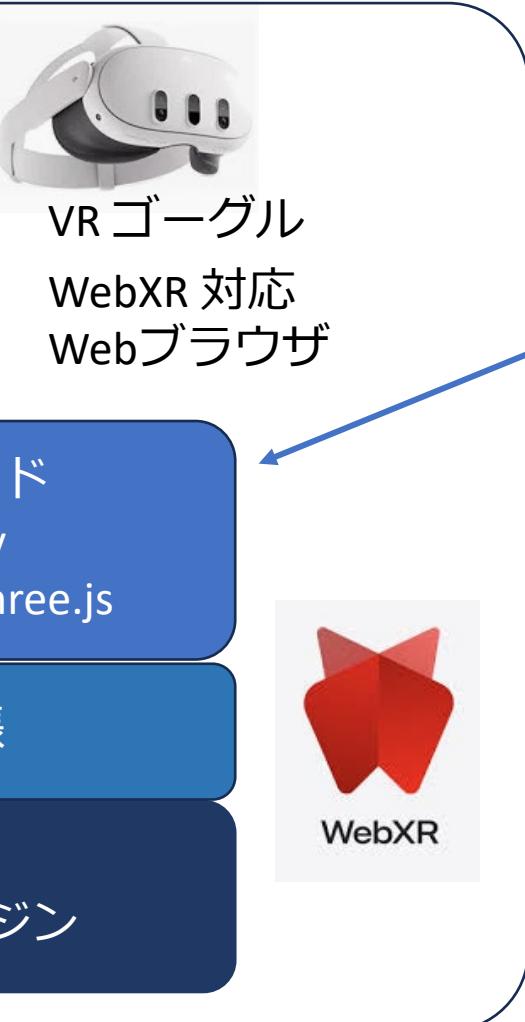
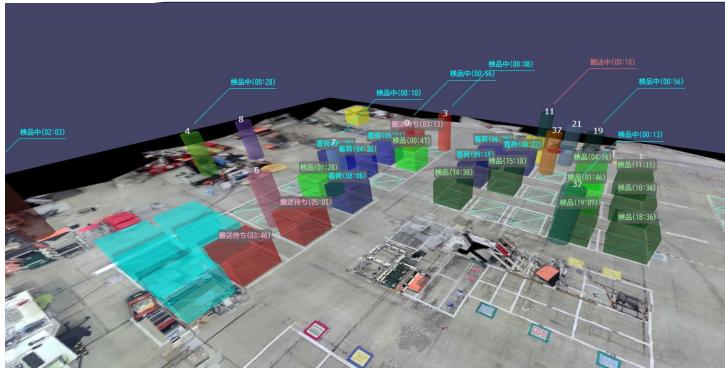


現在時刻 ■ Hide
11:00:00.0 / 36000:1
表示オプション
 Worker Label Task
■ Stats
■ Pallet ■ Trace ■ Info
■ PalStats ■ Stack
再生関係
■ 動画 11:00~



構築した可視化ツールの概要

クライアント側



サーバ側

開発したコード
JavaScript by
React/A-Frame/Three.js

Next.js

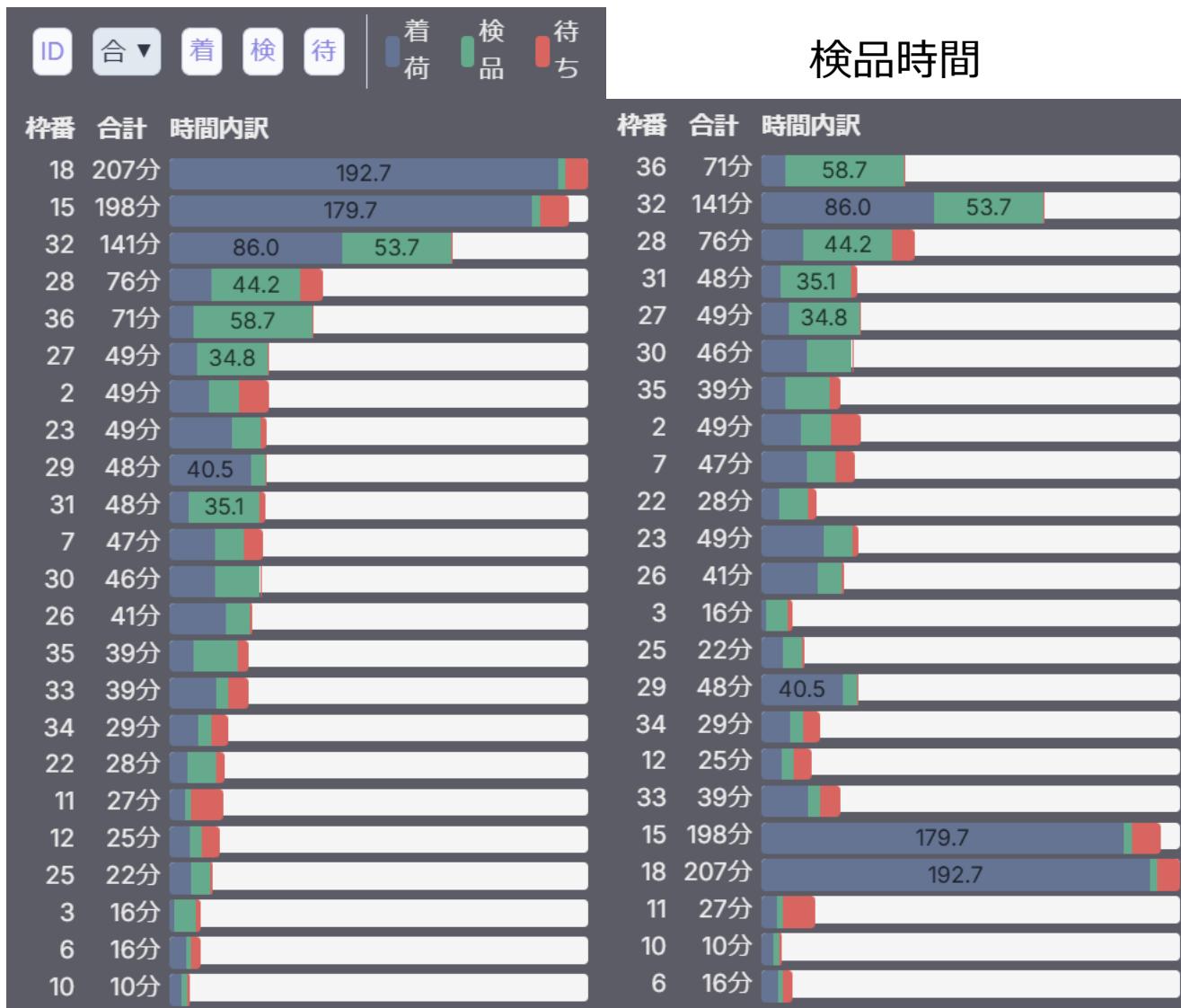
NEXT.js

Node.js (20.x~22.x)

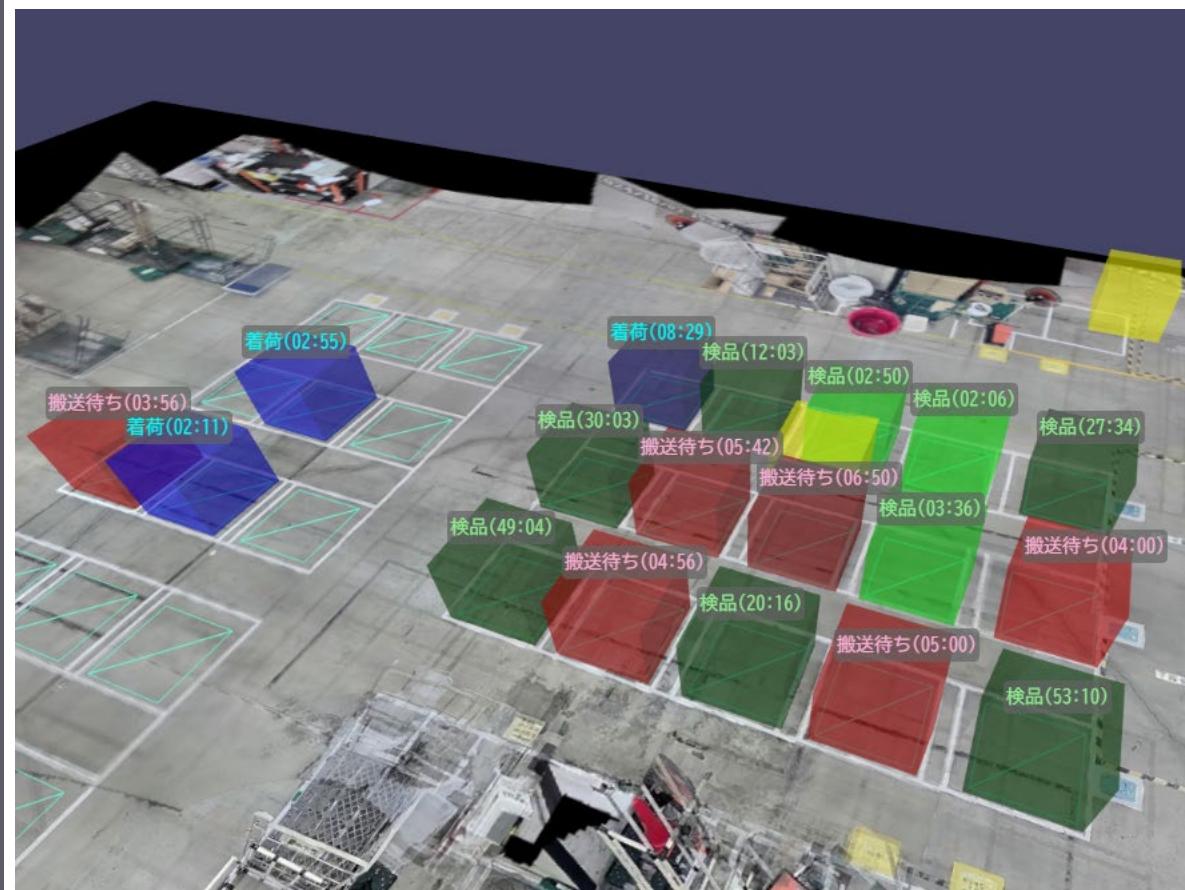
node.js

パレットの停滞状況

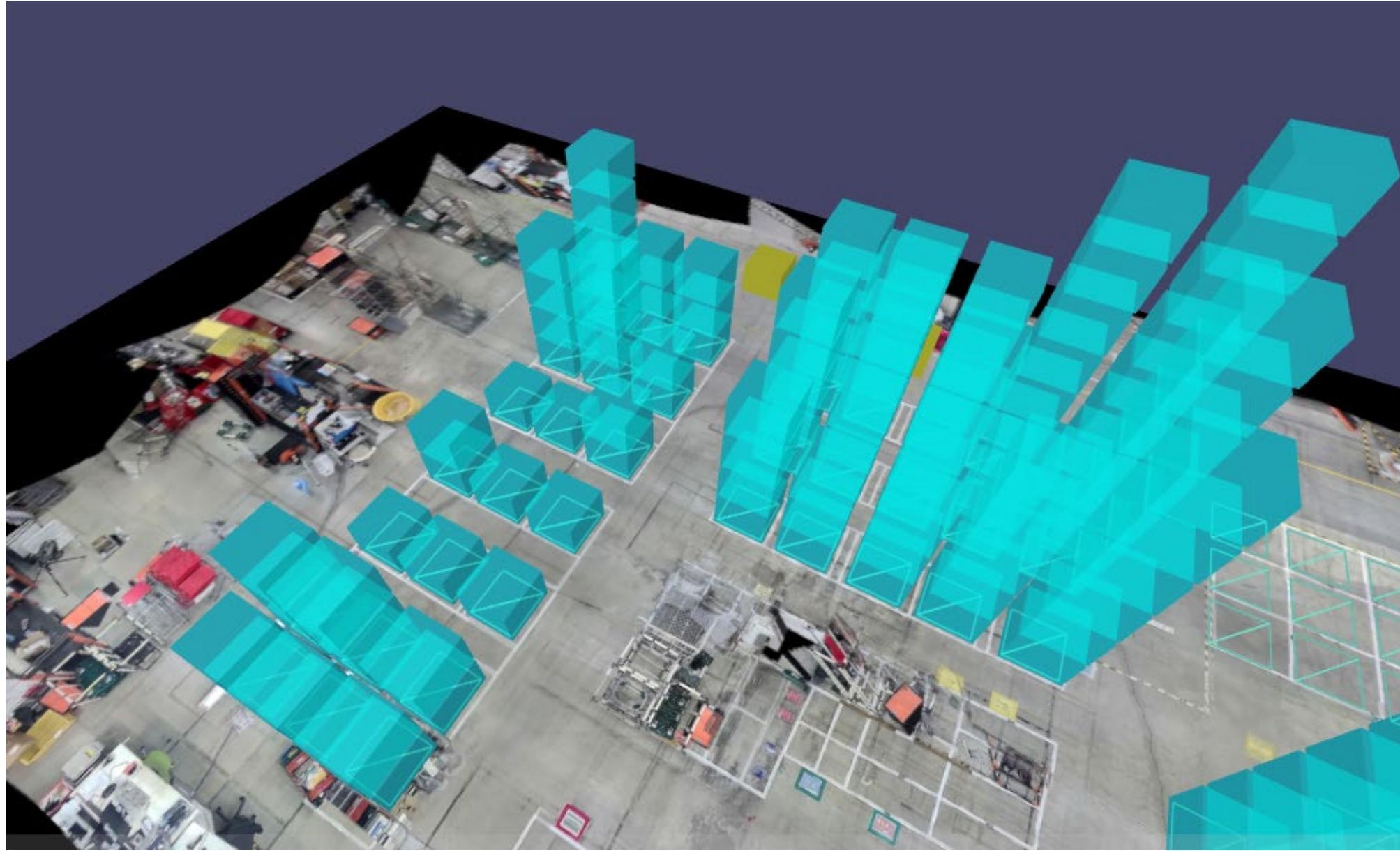
着荷～検品までの時間



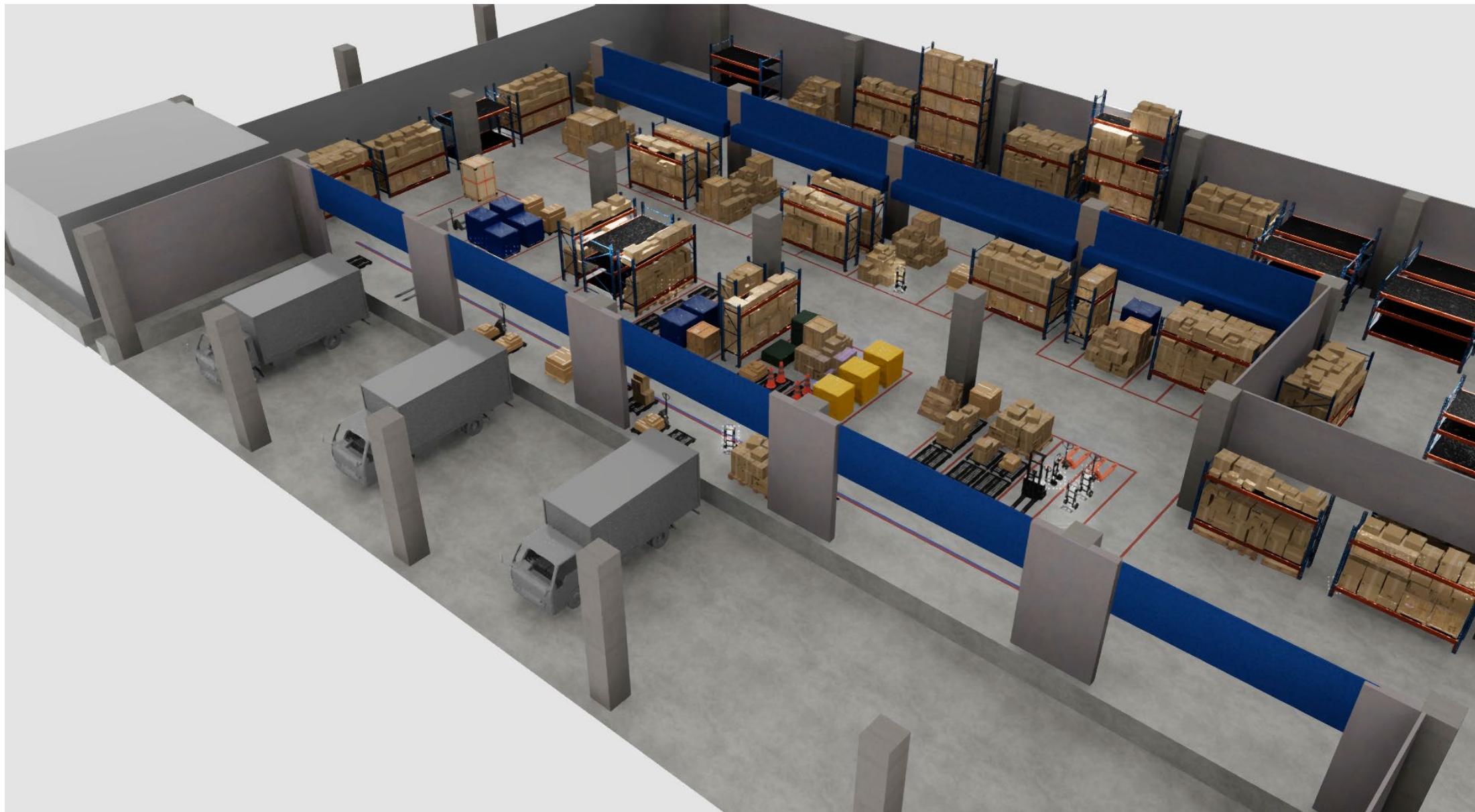
可視化システム上でも色+テキストで表示



パレット棟の利用頻度



倉庫内の3次元モデル⇒デジタルツインへ



倉庫でのロボットの活用

- ・多数の人型ロボットが登場しつつある
- ・Amazonの物流倉庫でも実証実験



中国では
量産販売も

しかし

ロボットへのティーチングが課題

- そこで、まずは人が直接教える方法を検討 ← 遠隔作業
- 実際の作業を遠隔で進めてもらいながら、大量のデータ収集
- 遠隔は、VRゴーグル経由で実行
 - メタバースで働くことから「メタワーク」と命名

現在 SIP3 プロジェクトで鋭意開発中！

↓ in control



国際カンファレンスで、デモ賞を受賞！

- ・ユビキタスコンピューティング分野のトップカンファレンス

UbiComp/ISWC2024 (560名参加)において、遠隔操作のデモを実施

→ 主に外国人研究者含め 80名以上が体験

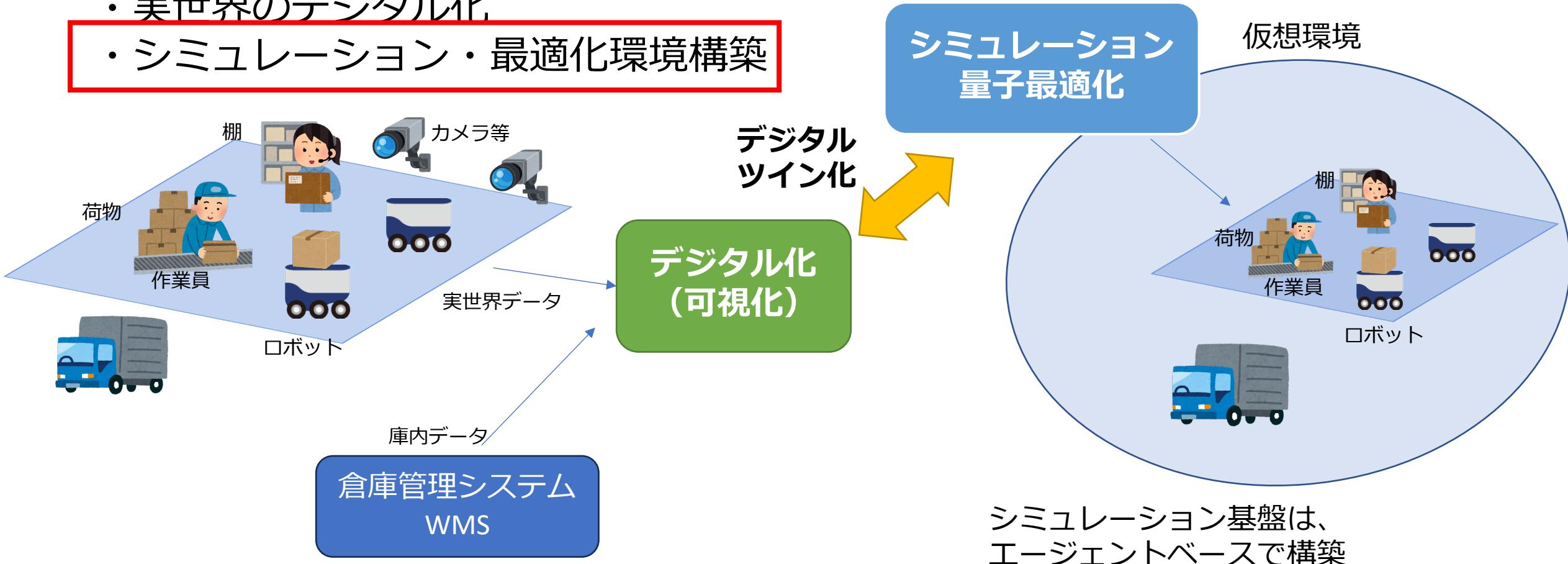
16 のデモ中で Best Demo Award !



デジタルツイン 研究開発コンセプト

2つの方向からのアプローチ

- ・実世界のデジタル化
- ・シミュレーション・最適化環境構築



倉庫シミュレータの開発

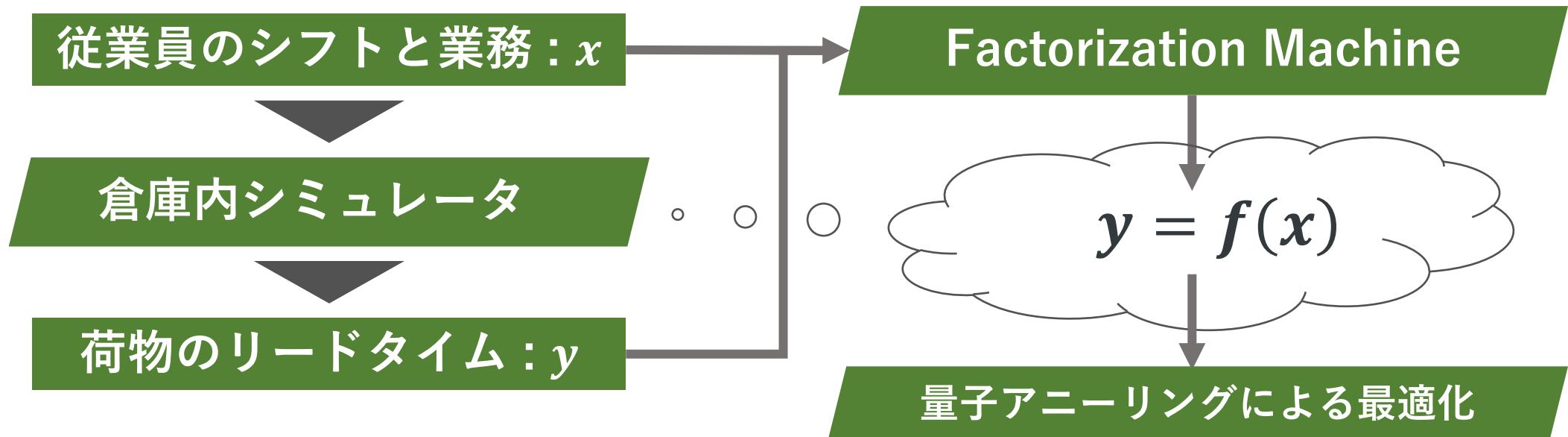


倉庫のレイアウトや、
作業員のシフトを
変更して、試行が可能

どんなレイアウト、シフトに
すれば最適？

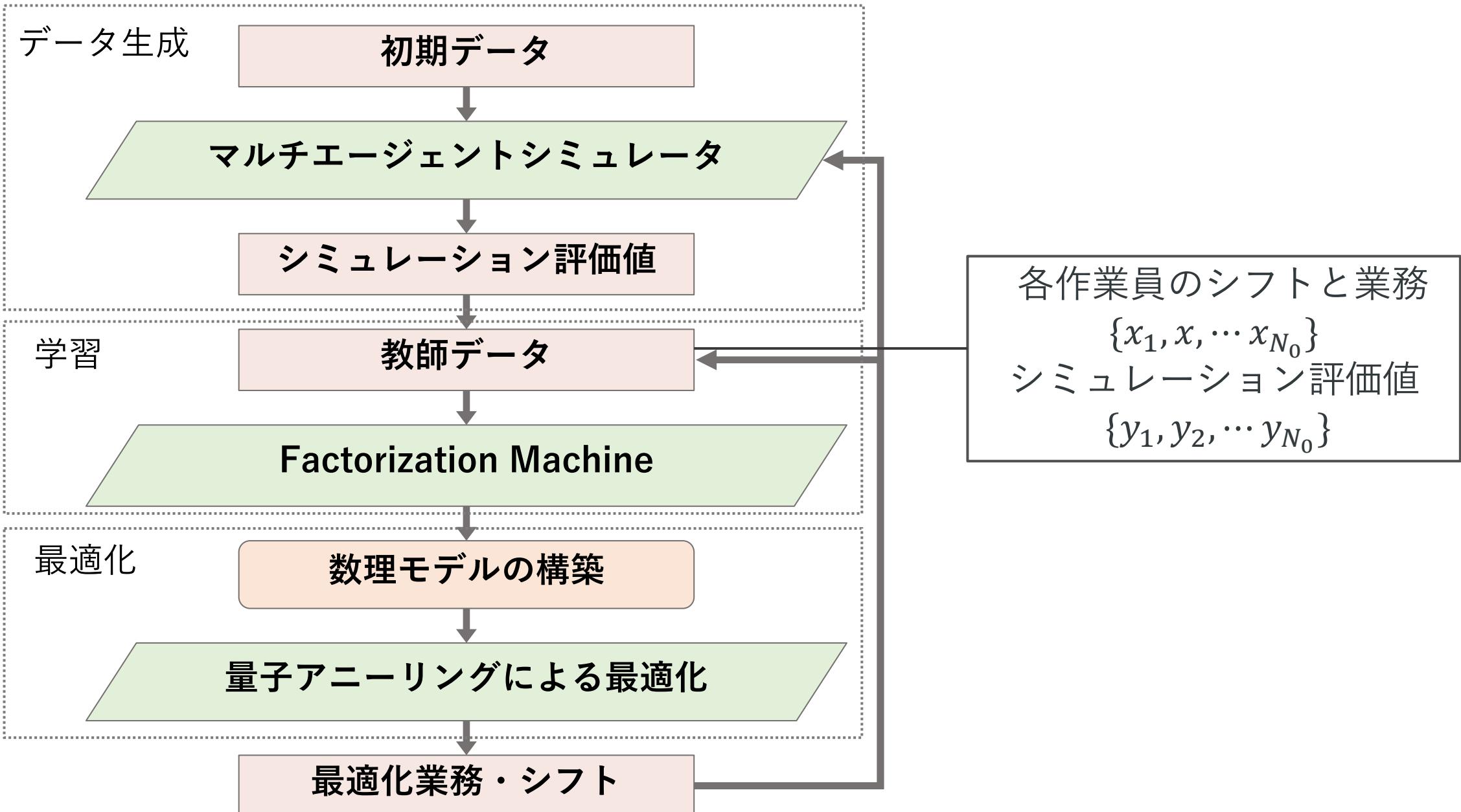
シミュレータによる最適化の検討

Factorization Machine (FM) と呼ばれる機械学習と、量子アニーリング (QA) による最適化



- 倉庫内シミュレータを構築し、入出力を学習
 - $y = f(x)$ に回帰
 - 目的関数が構築されることで最適化が可能

最適化の流れ





最適化の評価

$$H = \alpha H_s + \beta H_t + \gamma H_c \quad (\alpha \sim \gamma \text{は重み})$$

H_s : リードタイム、荷物残留数 H_t : 合計労働時間

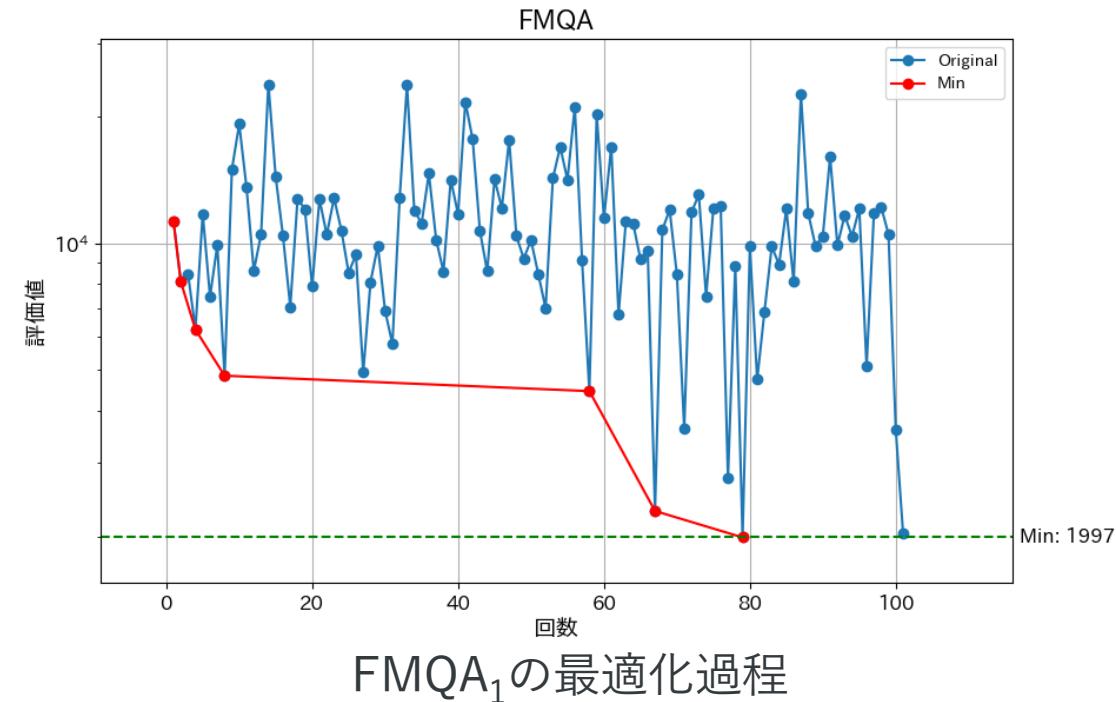
シフト・業務	α	β	γ	リードタイム	荷物残留数	合計労働時間
現実の倉庫のシフトと業務				1430	55	184
FMQA 1	1	10	1000	997	34	156
FMQA 2	1	5	1000	942	24	164
FMQA 3	1	1	1000	895	2	184

FMQA 1

- 合計労働時間を **10.8%**
- リードタイムを **30.23%**
- 荷物残留数を **35.50%** 削減

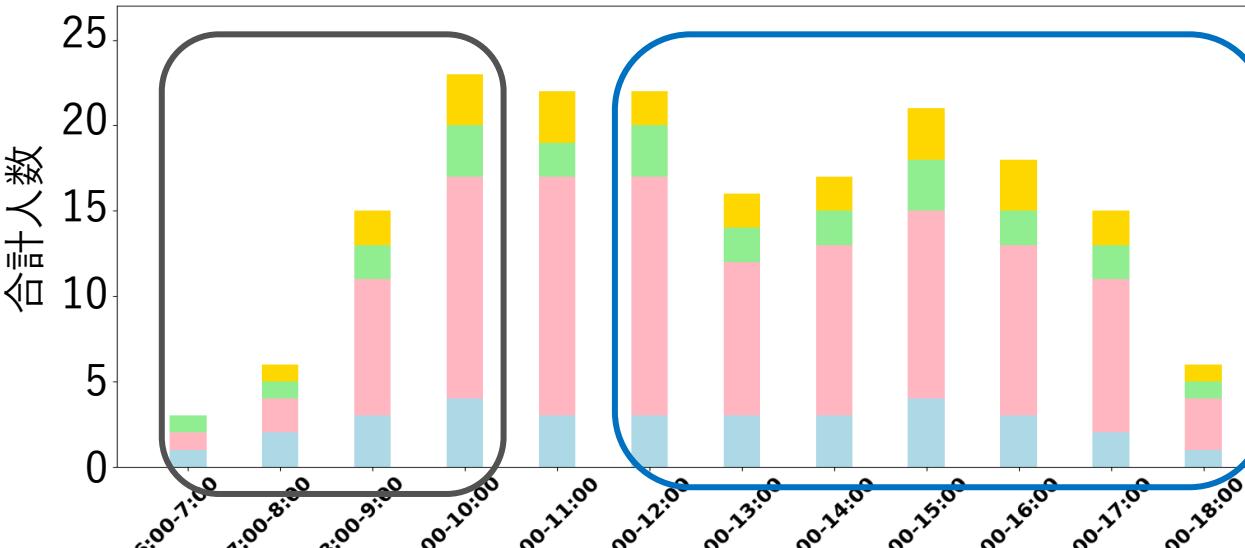
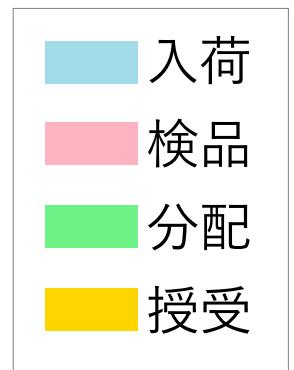
FMQA 3

- リードタイムを **38%**
- 荷物残留数を **94.5%** 削減



最適化結果の検討

現実の倉庫のシフトと業務

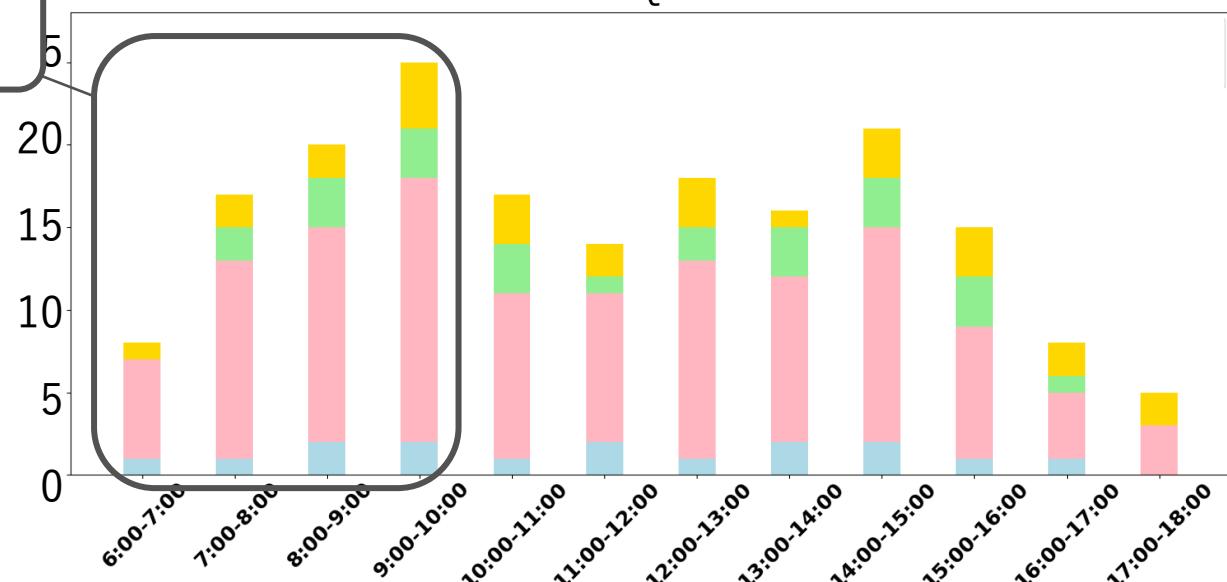
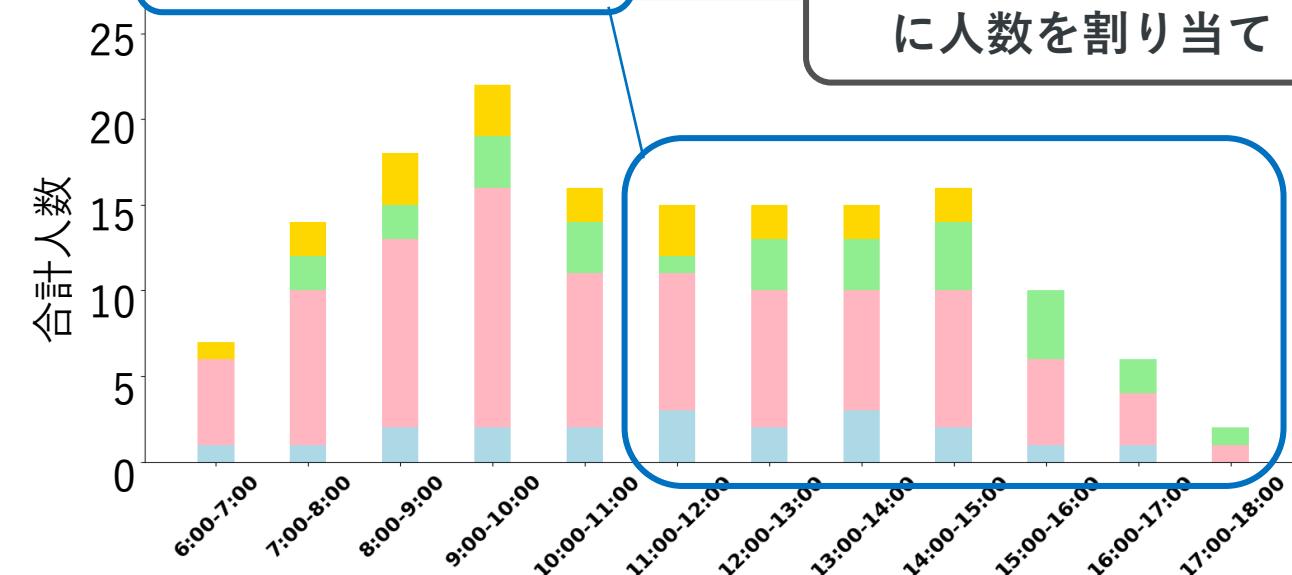


荷物の少ない時間帯
の作業員数を削減

FMQA 1

早朝と荷物大量入荷時
に人数を割り当て

FMQA 3



その他の研究

◎カメラ+AIによる天井図面作成支援

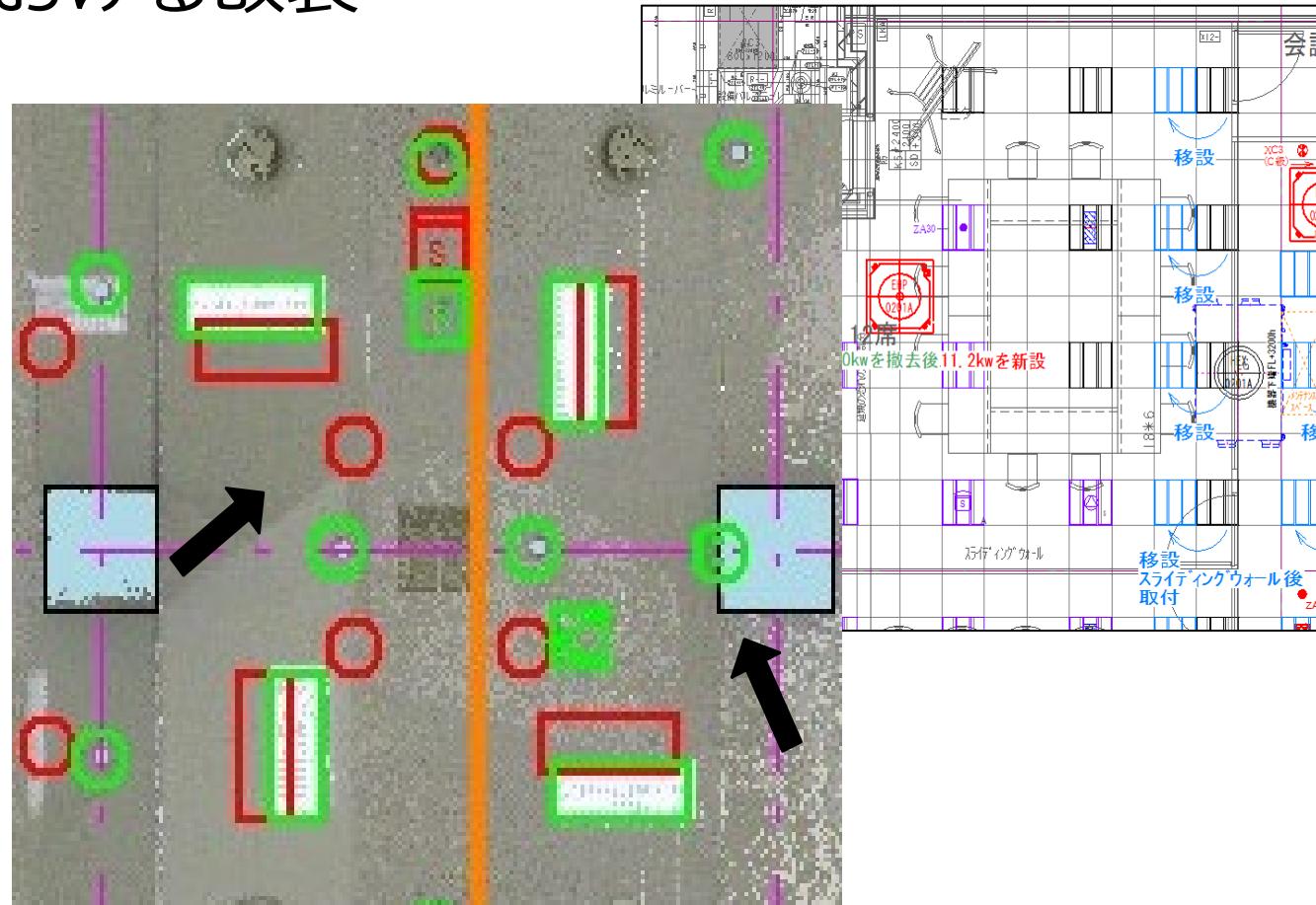
- 電気設備・空調設備などでにおける改裝

図面が現場と合ってるのは
限らない

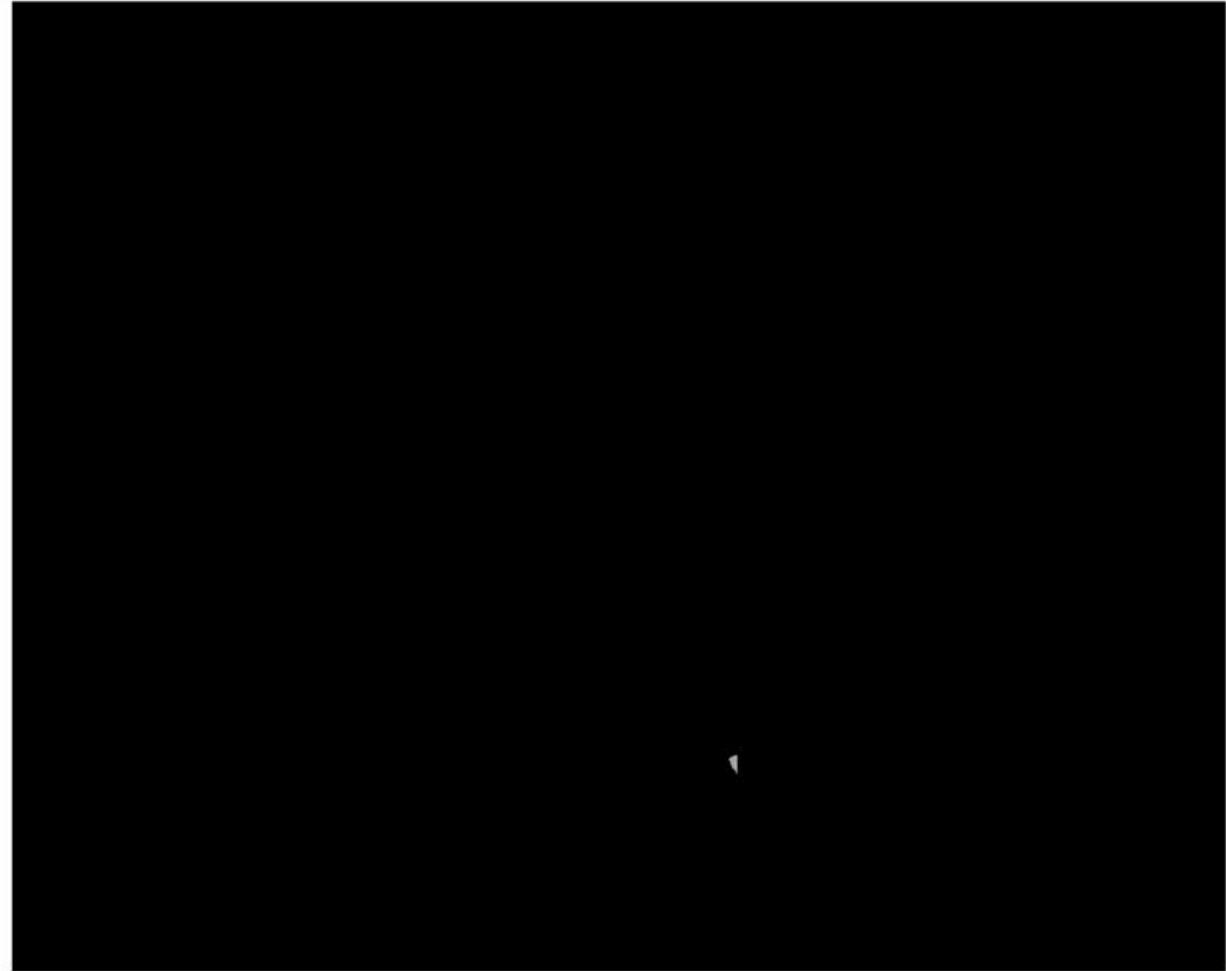
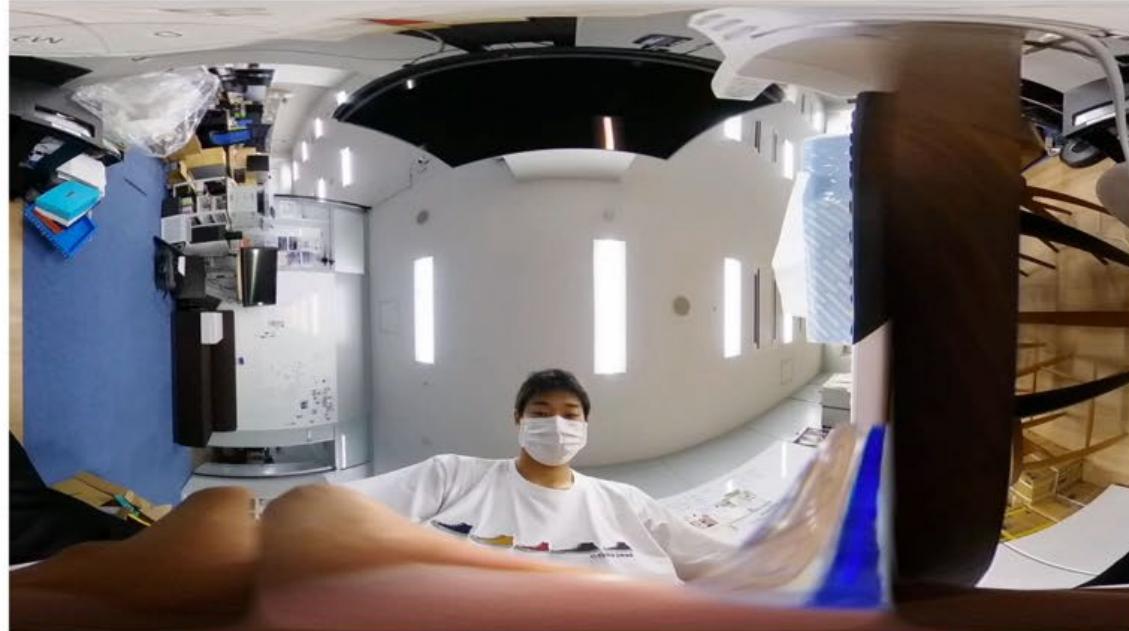
- 現場の状況を確認する
手間を削減したい！



360度撮影可能な
カメラで簡単に
できないか？



360カメラで空間取得して、図面を作成



先端技術を用いると、コスト削減・作業効率化が可能に！



おりに



Glocal Interverse Platform for Regional Revitalization

- Society5.0時代のデジタルツイン活用では、その実現のため、
実世界データの取得
可視化・分析ツールの構築
シミュレーション
といった様々な枠組みが必要。
個別に多数のノウハウが必要です！

詳細にご興味があれば、ぜひお知らせください
連絡先： 河口研究室
sec@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

YouTube 「河口研チャンネル」
<https://bit.ly/uclabChannel>

