

# 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



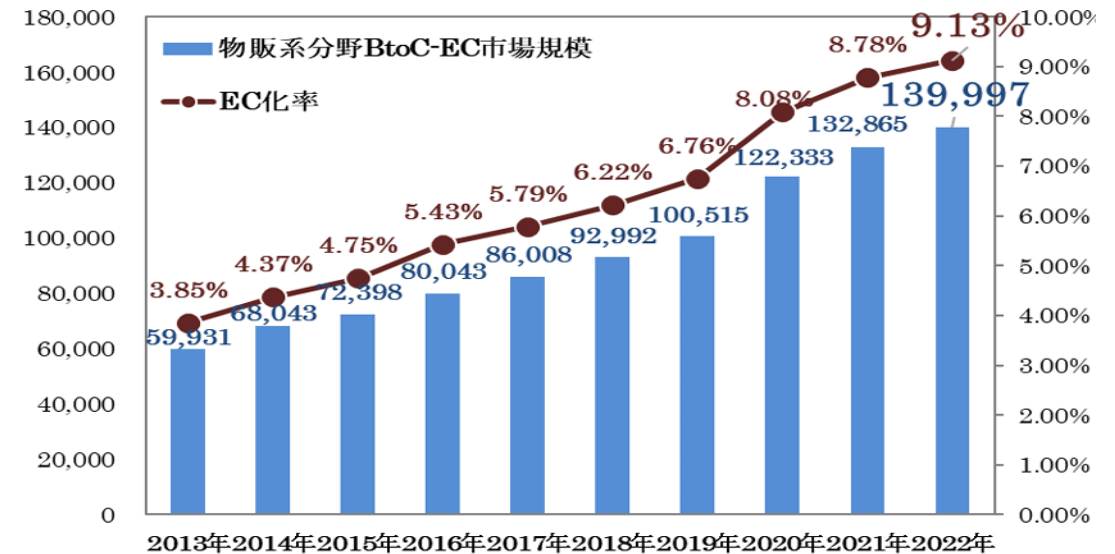
# 社会課題・事業課題：人手不足と最適化の難しさ

- 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・カンに頼る庫内作業**（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

EC化率 9%超

市場規模 **14兆円**

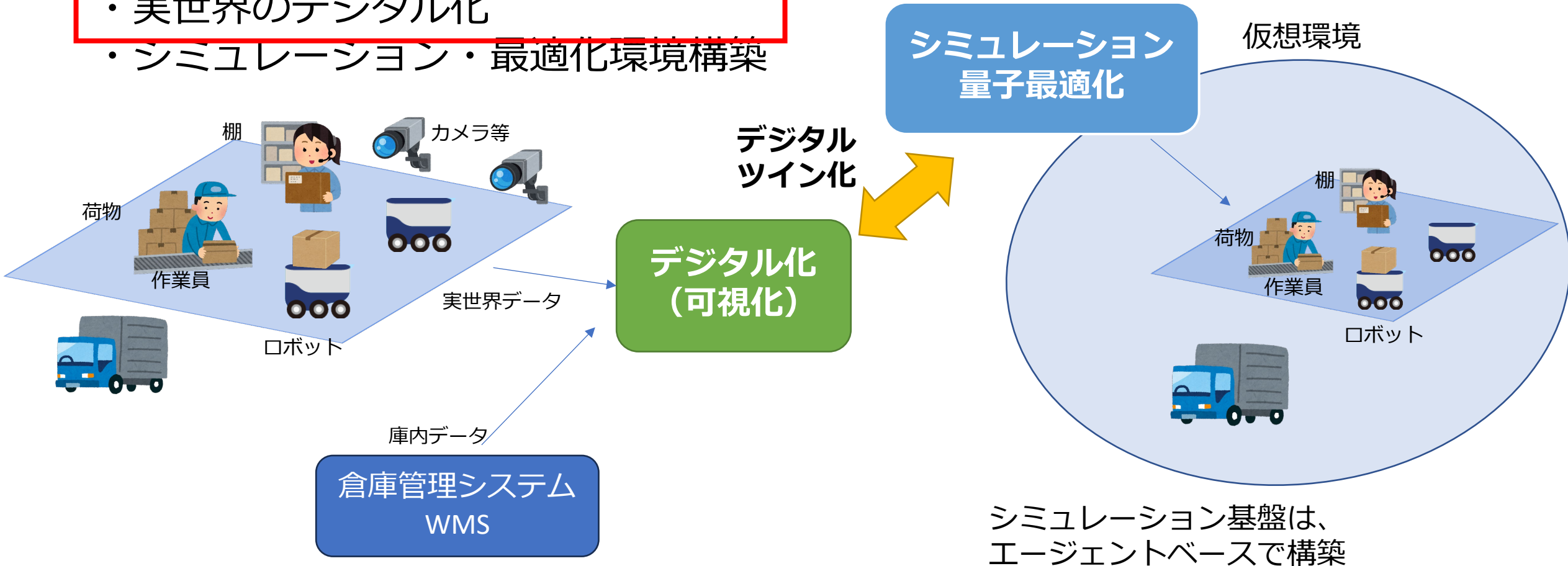
物流クライシス



# 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





# 入在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）

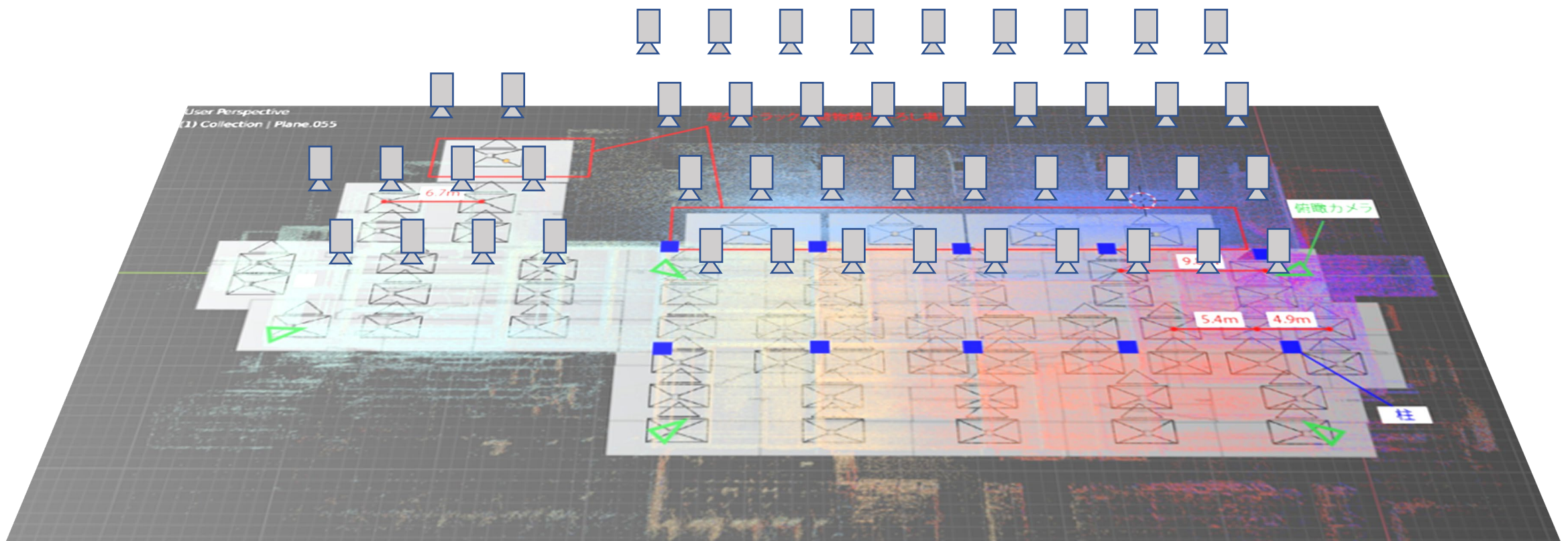


この入庫エリアだけで  
30m x 50m の広さ

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

+

Image Item

pos\_x : —

pos\_y : —

pos\_z : —

rotate\_x : —

rotate\_y : —

rotate\_z : —

size : —

trim\_top : —

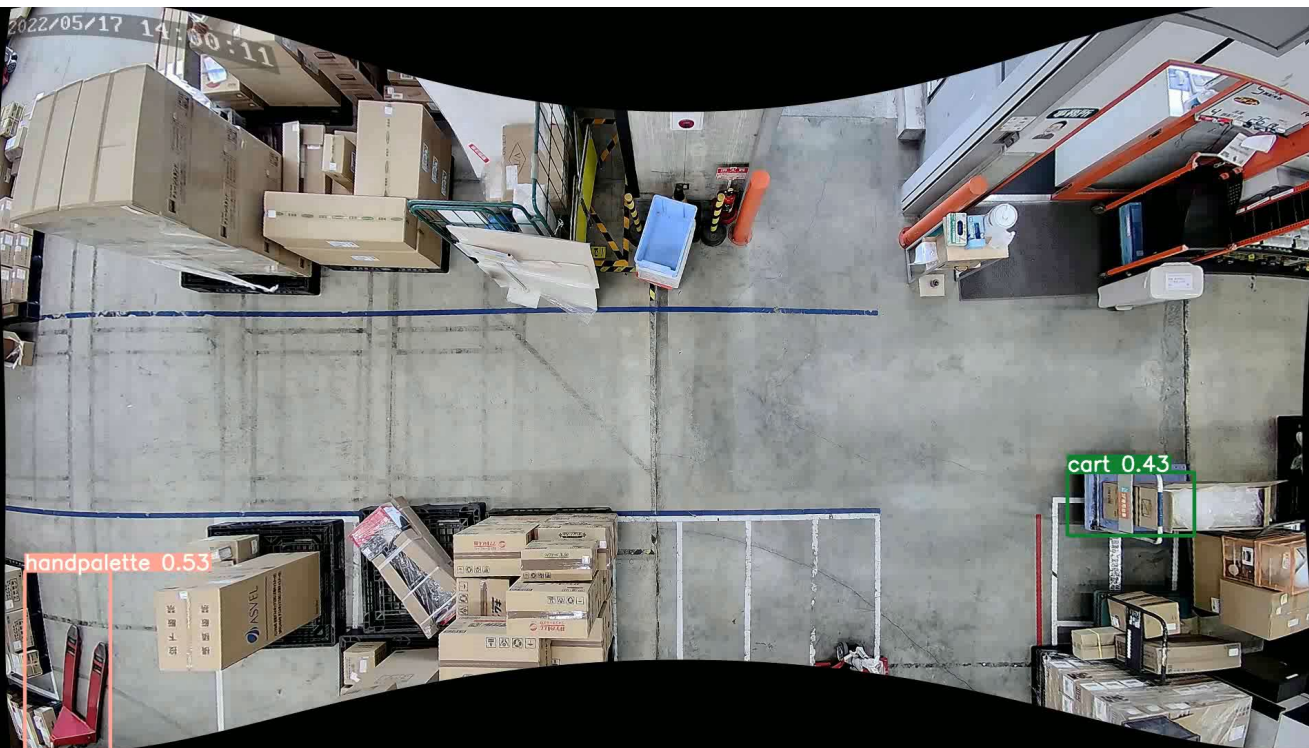
trim\_bottom : —

trim\_left : —

trim\_right : —

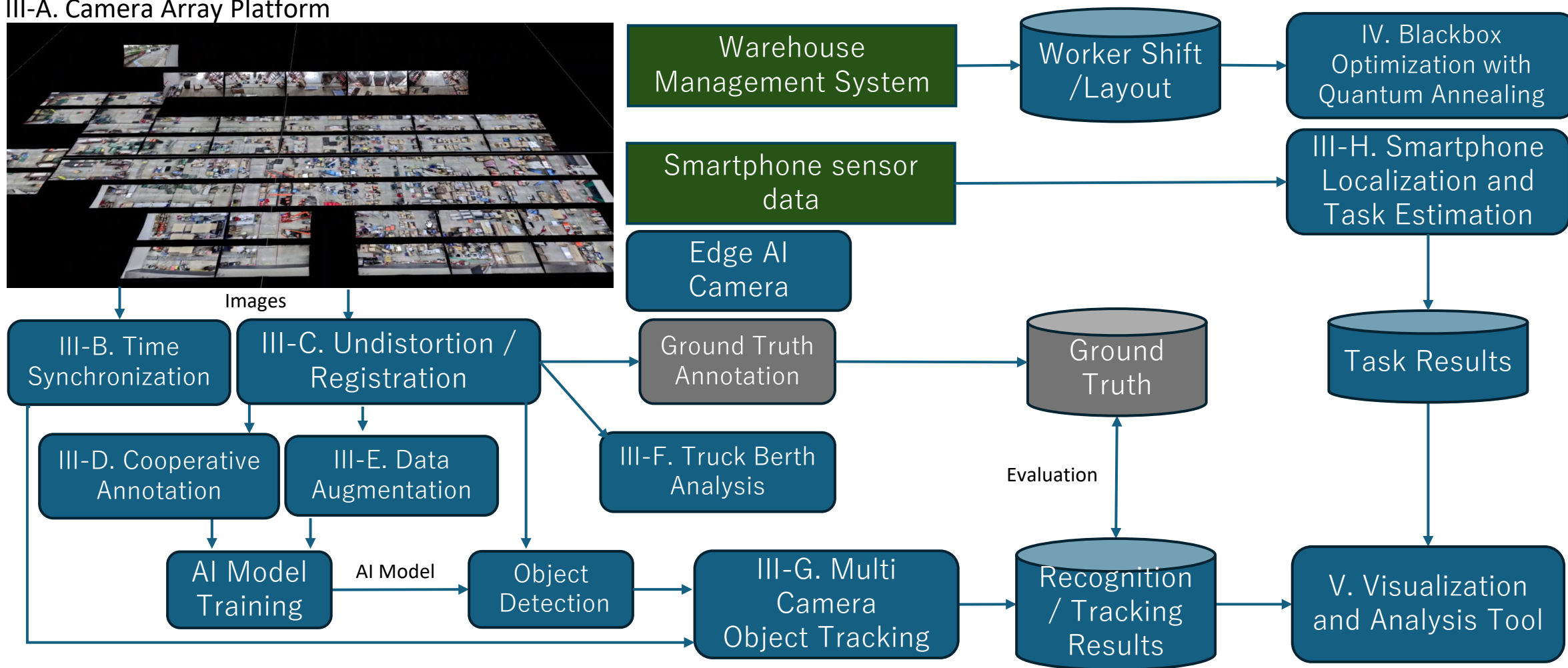
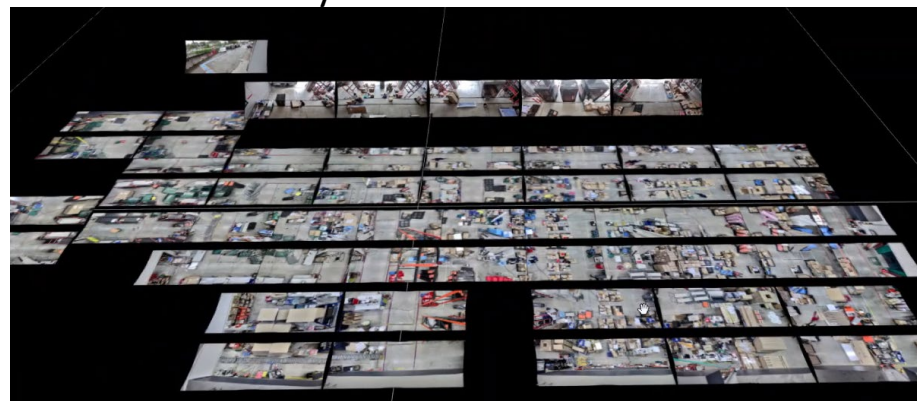
# 実世界(カメラ)情報のデジタル化

- 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

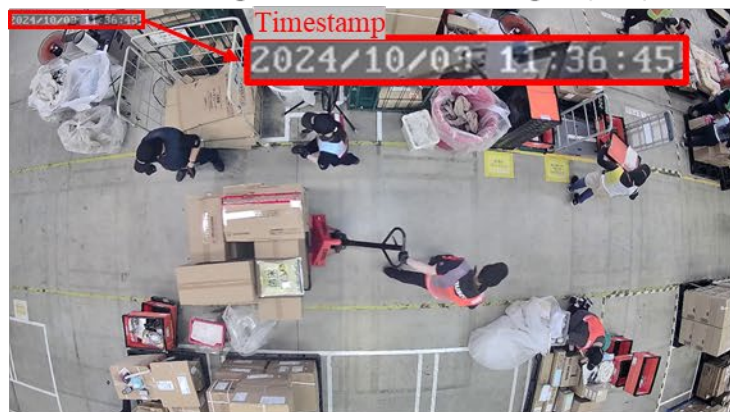
## III-A. Camera Array Platform



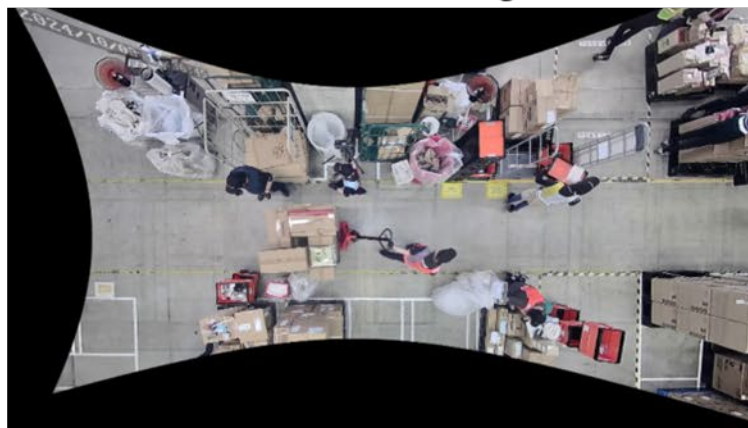


# カメラの歪構成とステッチング

Original camera image (A2)



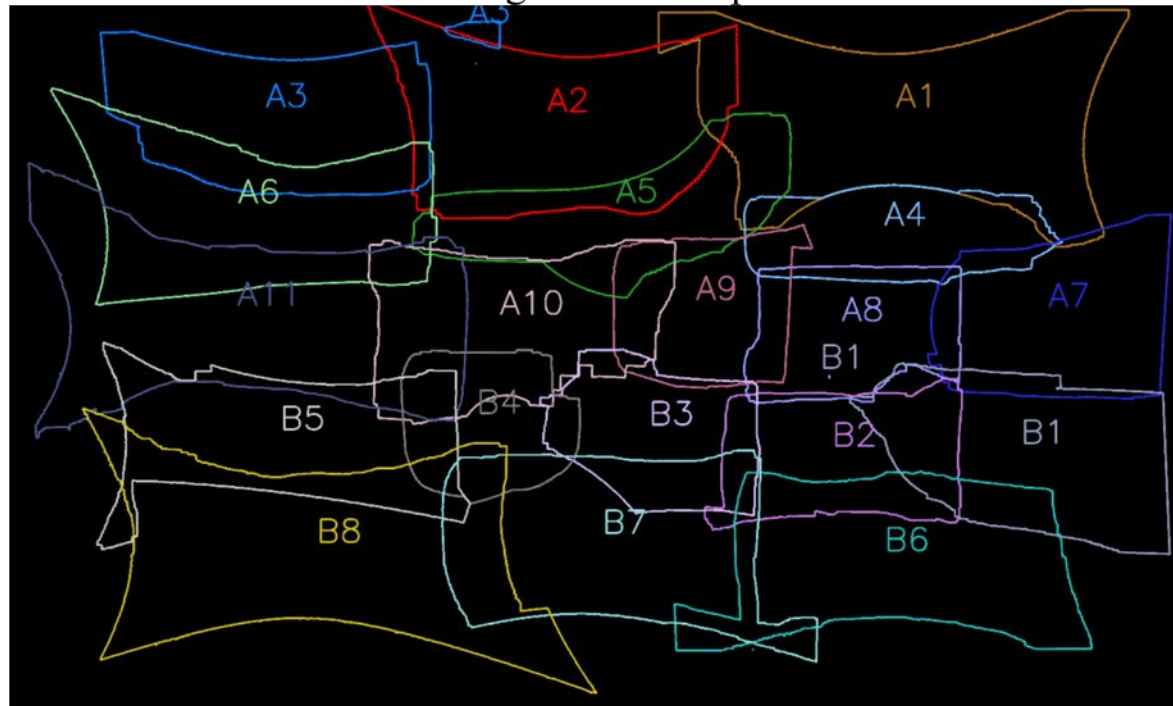
Undistorted image



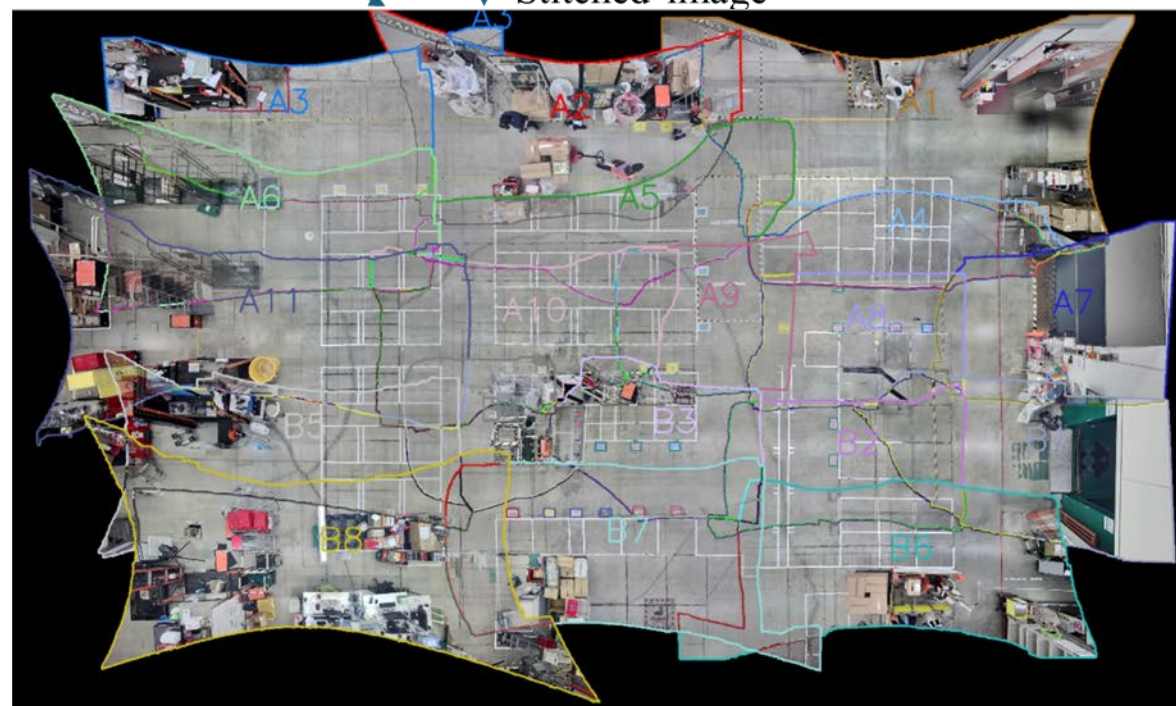
Mask image



Camera registration map

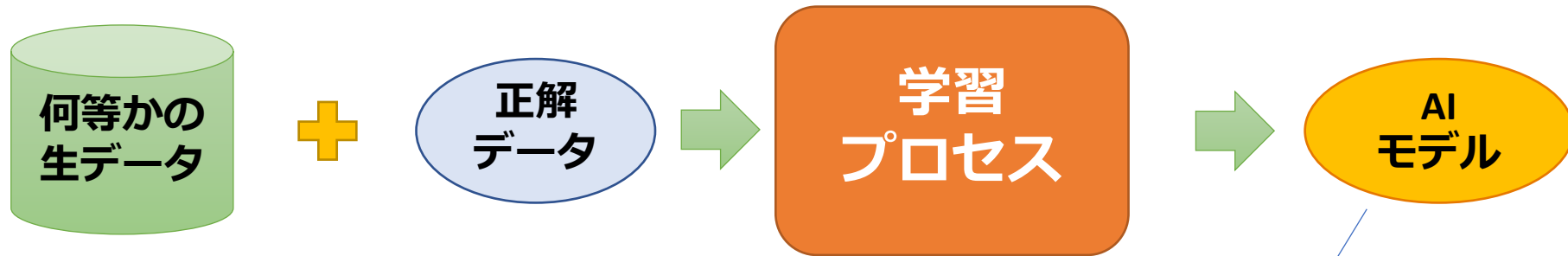


×  
Stitched image

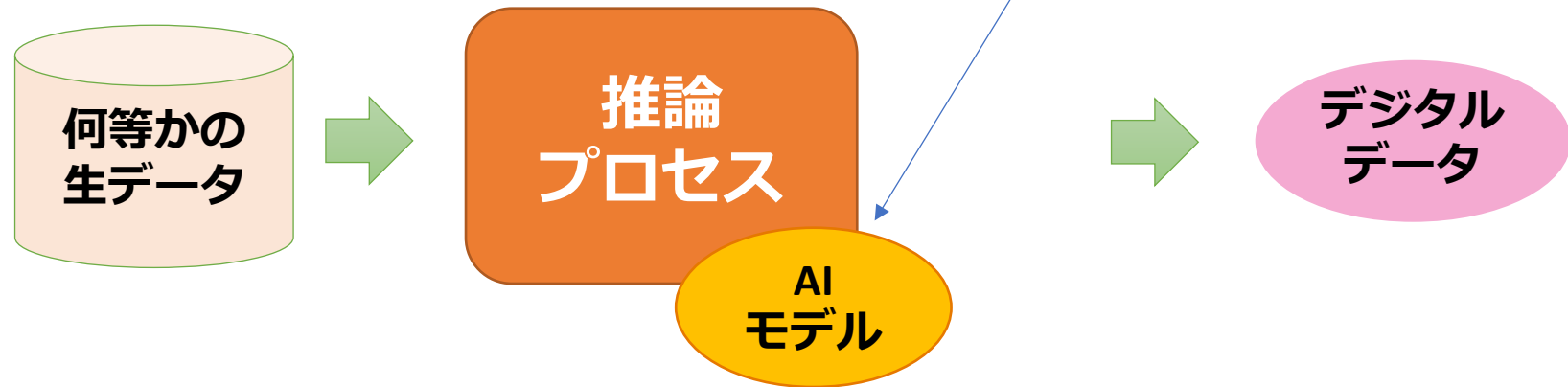


# AIモデルの構築

## 学習フェーズ



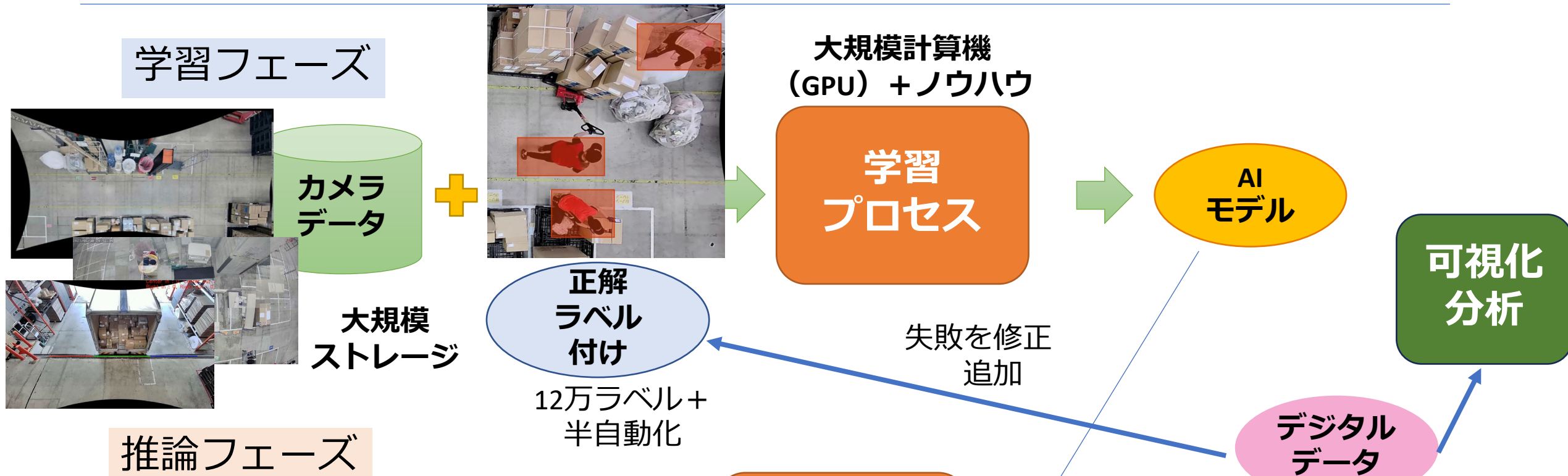
## 推論フェーズ



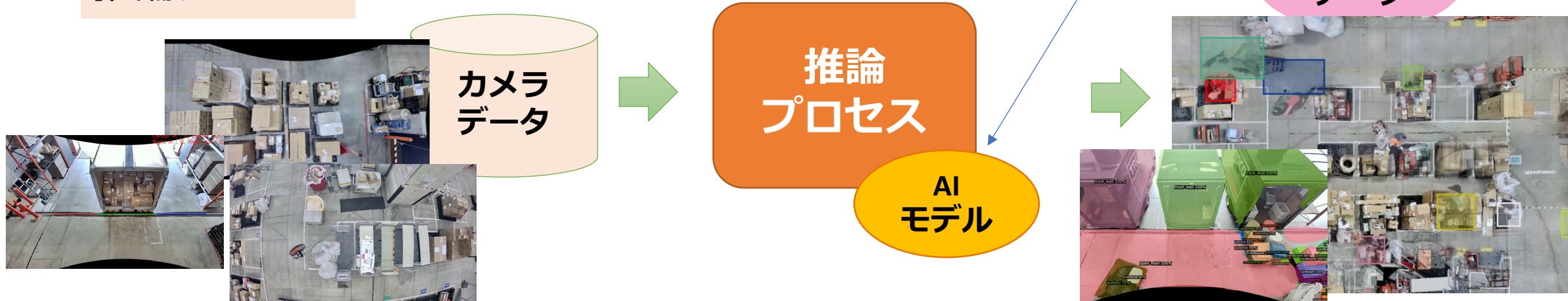


# 物流倉庫のデジタルツイン構築

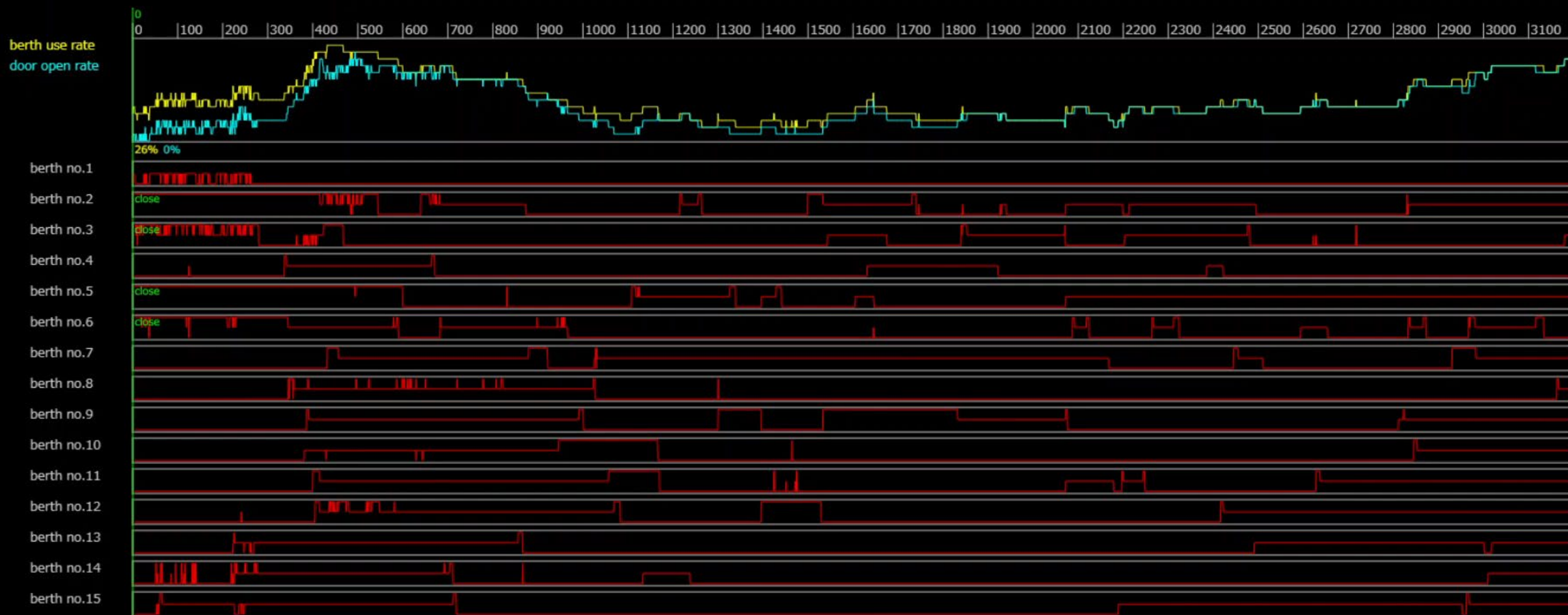
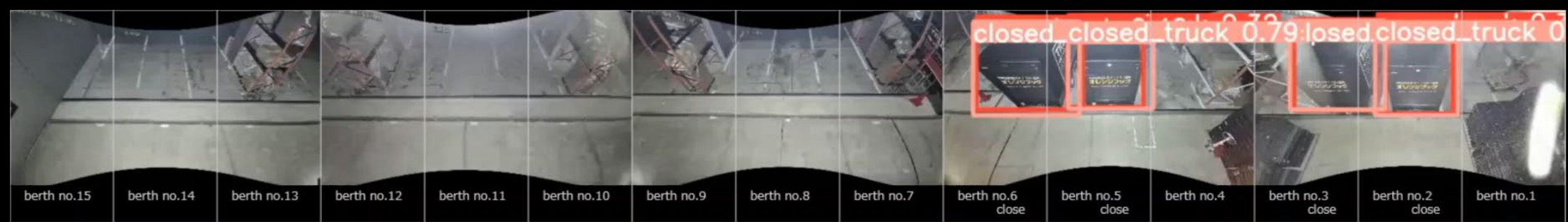
## 学習フェーズ



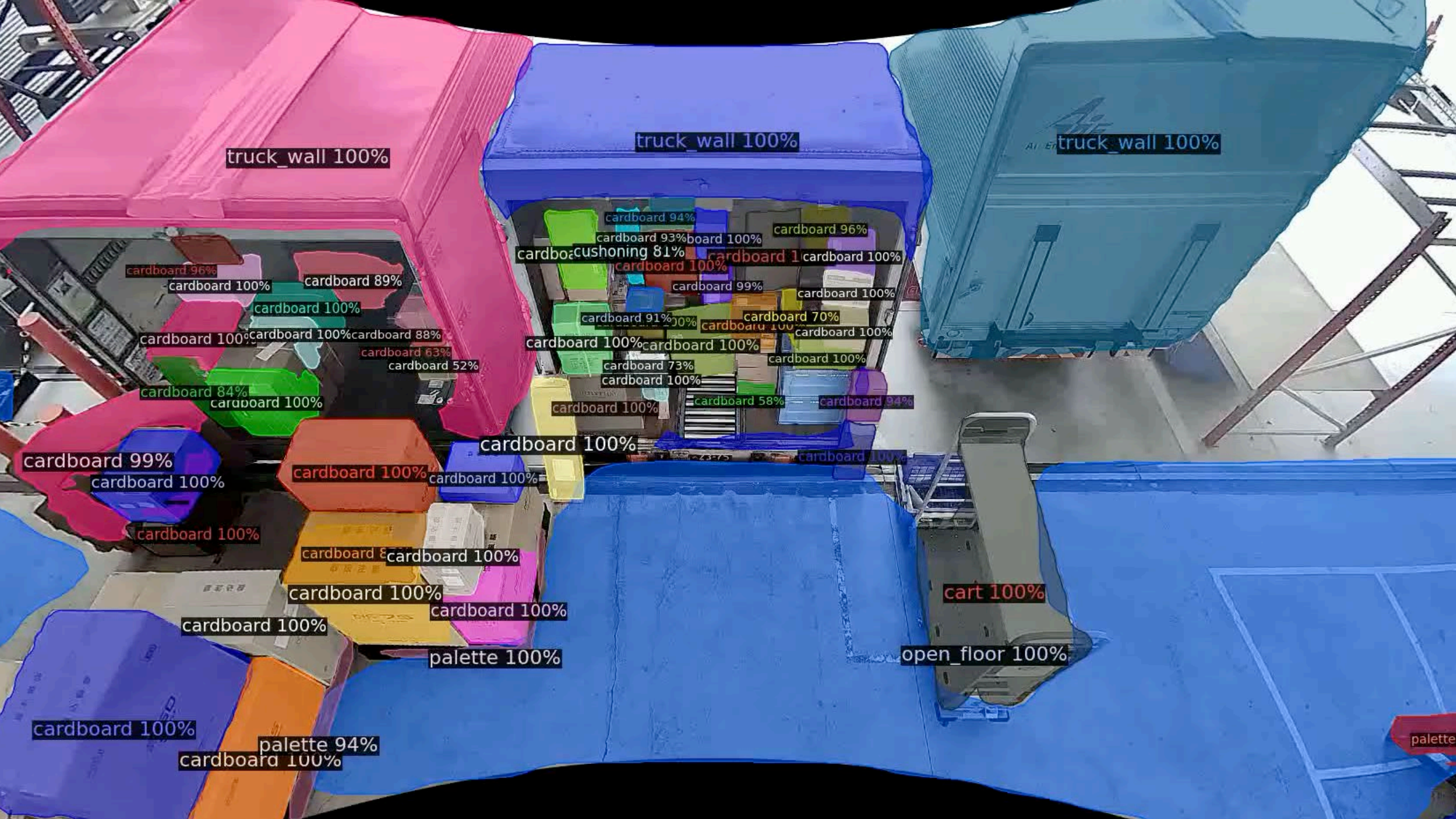
## 推論フェーズ













# 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



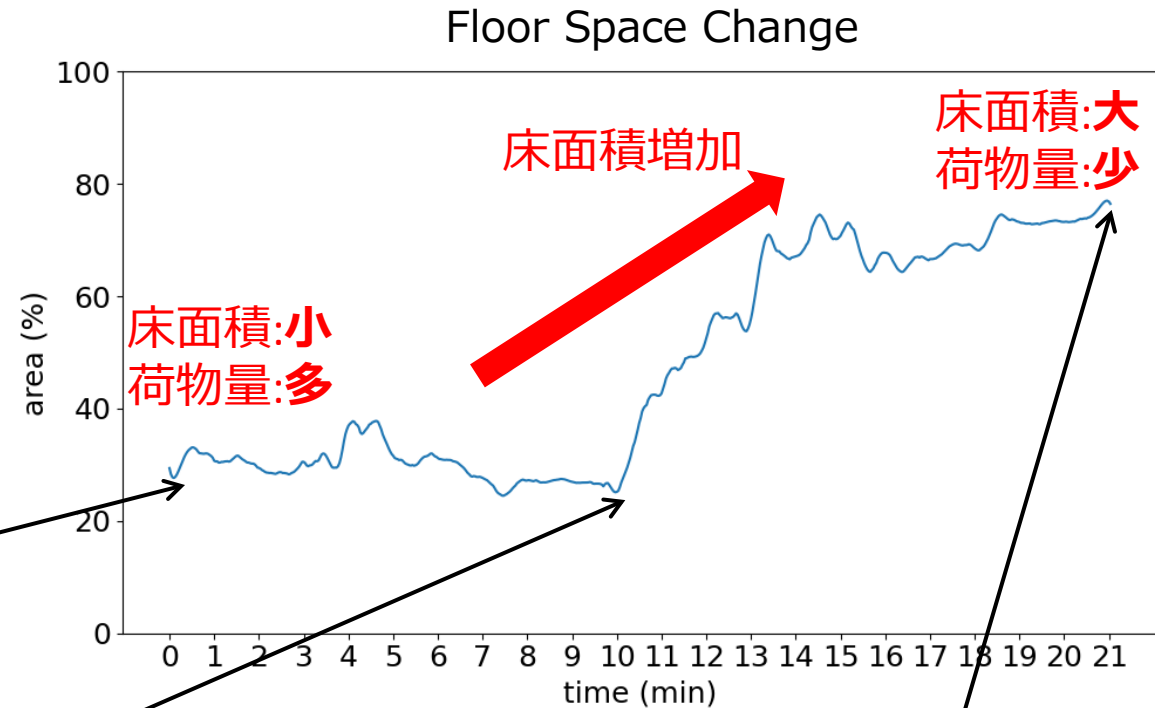
packed\_container

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

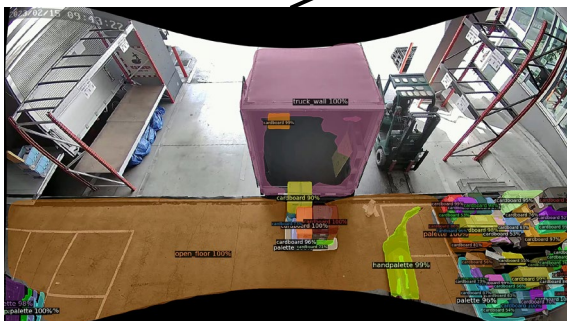
# 荷物量の算出

## 床面積から荷物量を算出

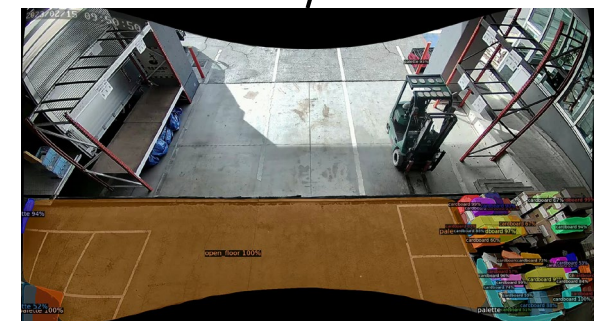
- 床面積の推移から荷物量推移を算出
- 横軸:経過時間(min)
- 縦軸:床面積の空き(%)
  - 100%は完全に空いている状態
  - 0は空きがない状態



time = 0(min)

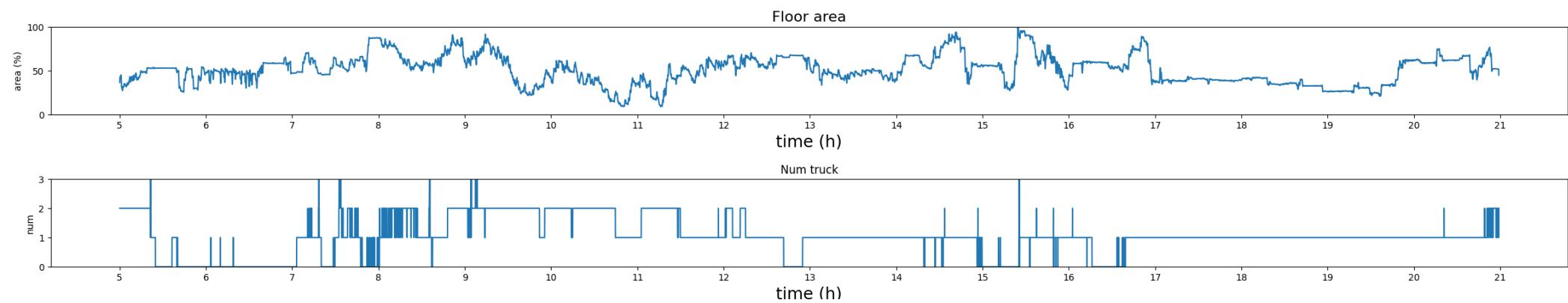


time = 13(min)

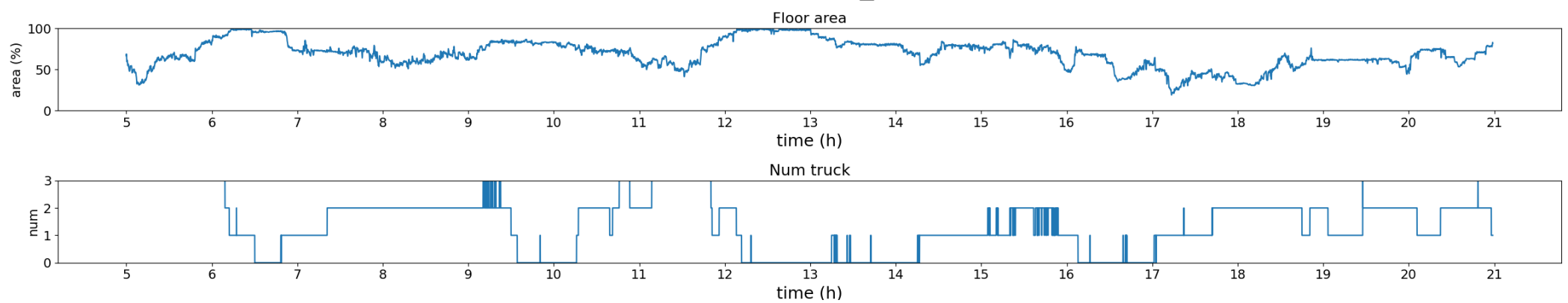


time = 21(min)

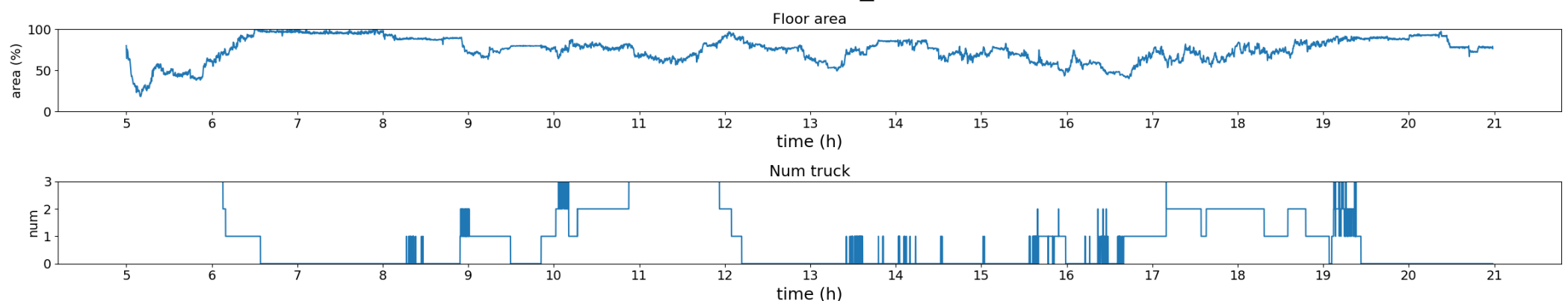
20230222Out\_G1



20230222Out\_G3



20230222Out\_G4



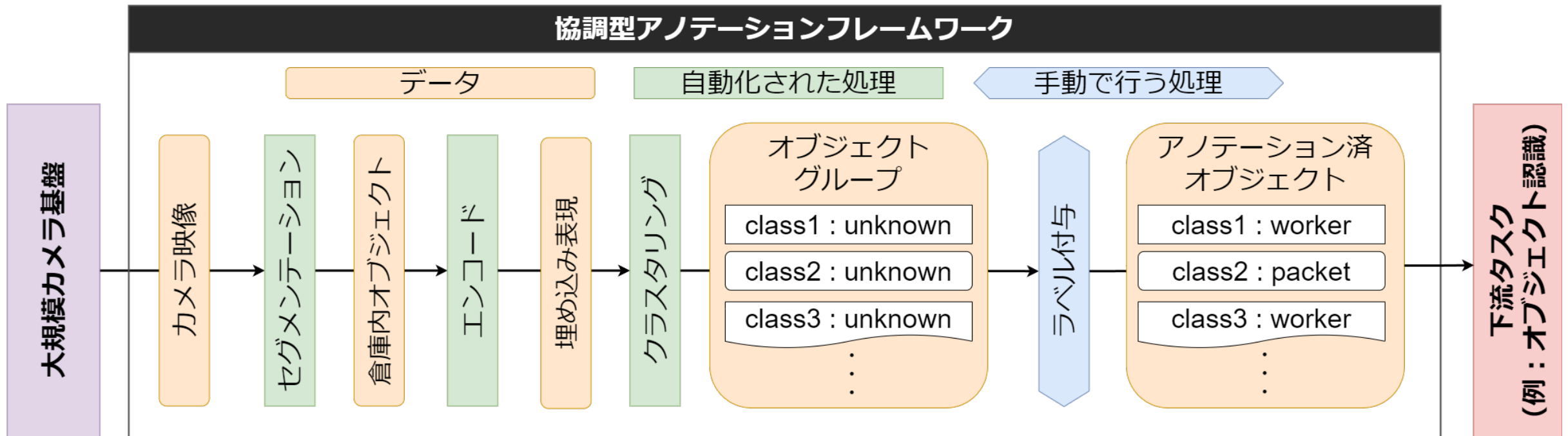


## 荷物の位置・ステータスの 正解データも同時に表示

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

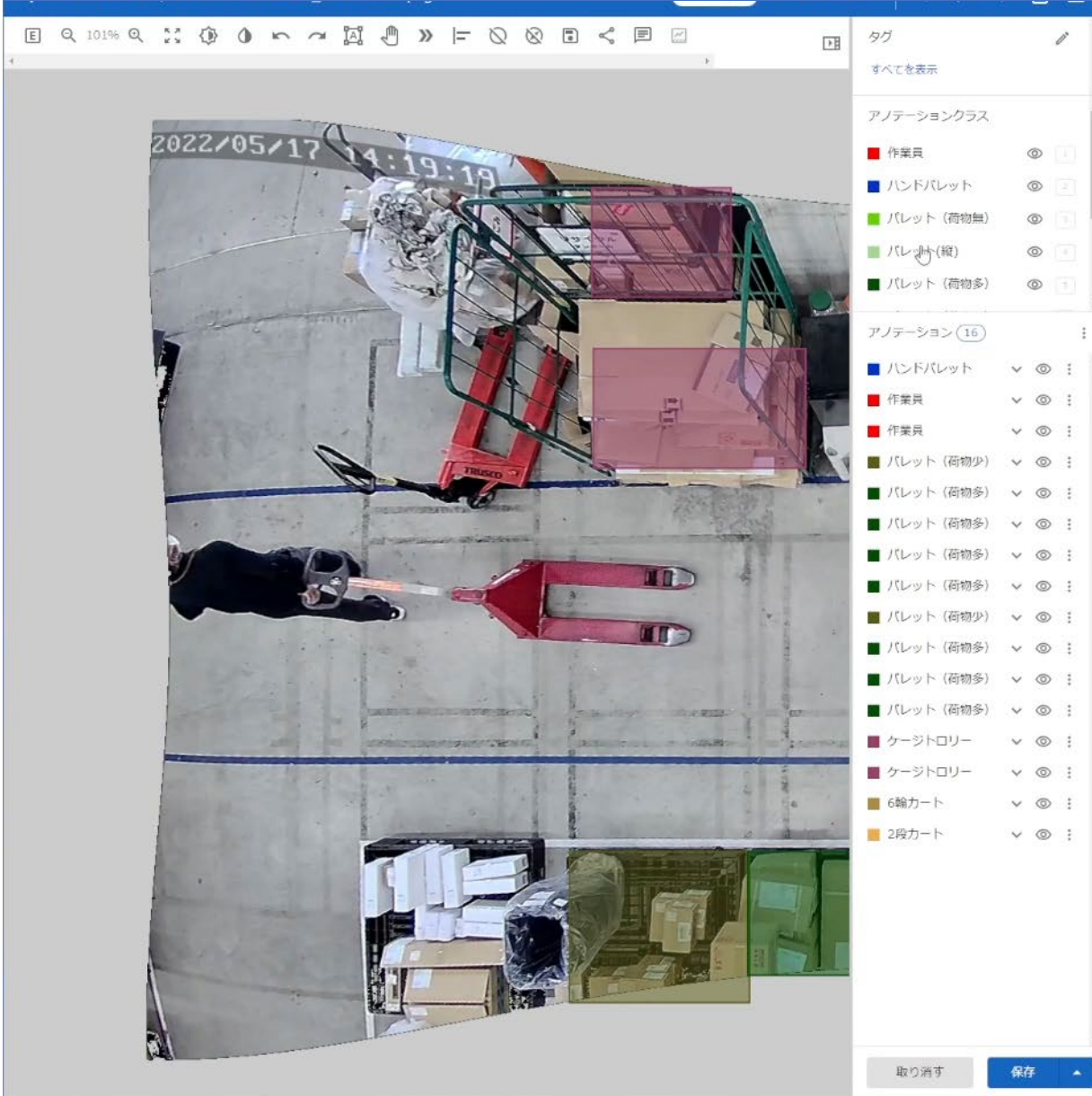
- AIモデルを構築するには、学習のためのアノテーションが必須（物流倉庫は、一般的なモデルでは認識率が不十分）
- 完全自動は困難なので、半自動（協調型）を構築





# 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

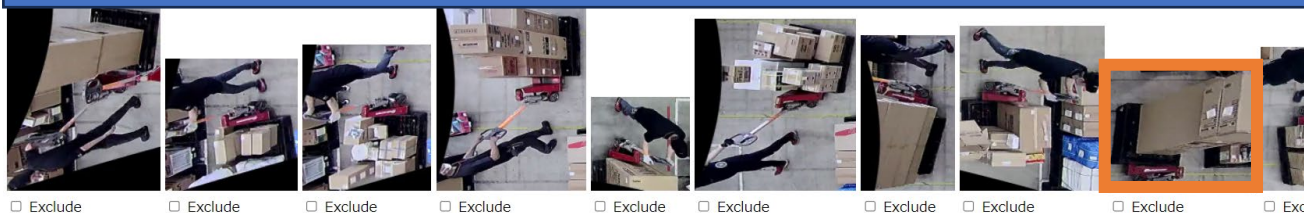




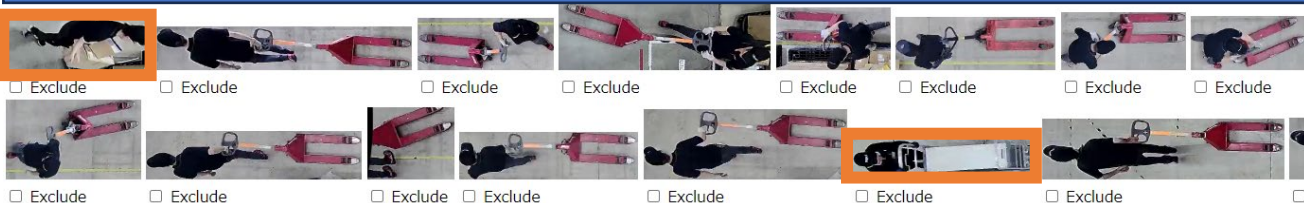
# 協調型アノテーションの有効性

- 様々なオブジェクトに対しての有効性を確認

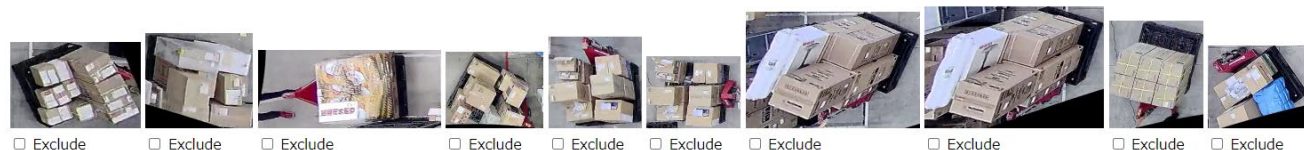
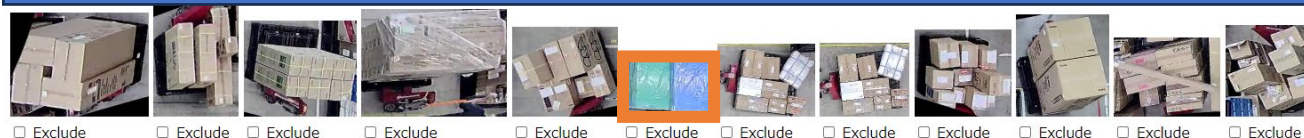
## 作業員+ハンドパレット+荷物



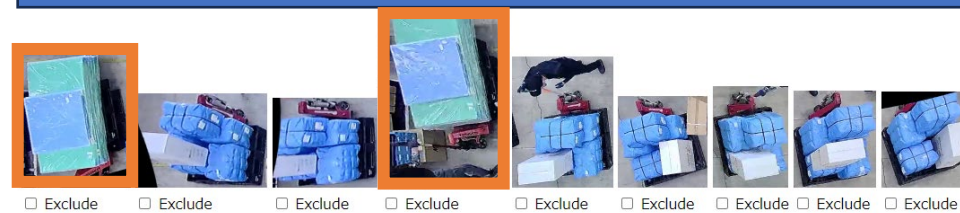
## 作業員+ハンドパレット



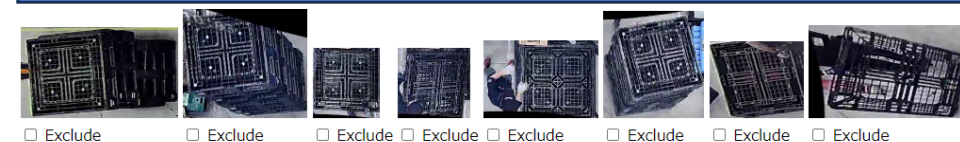
## 荷物 (段ボール群)



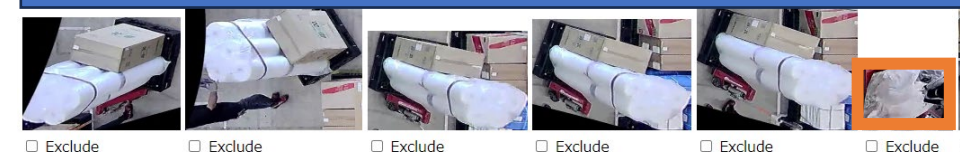
## 荷物 (青梱包)



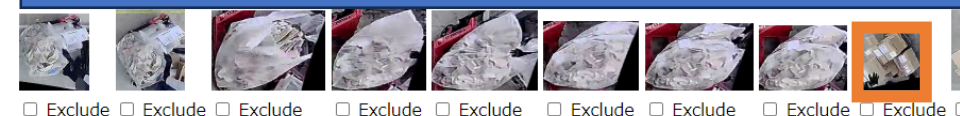
## パレット



## 荷物 (円柱形状+段ボール)

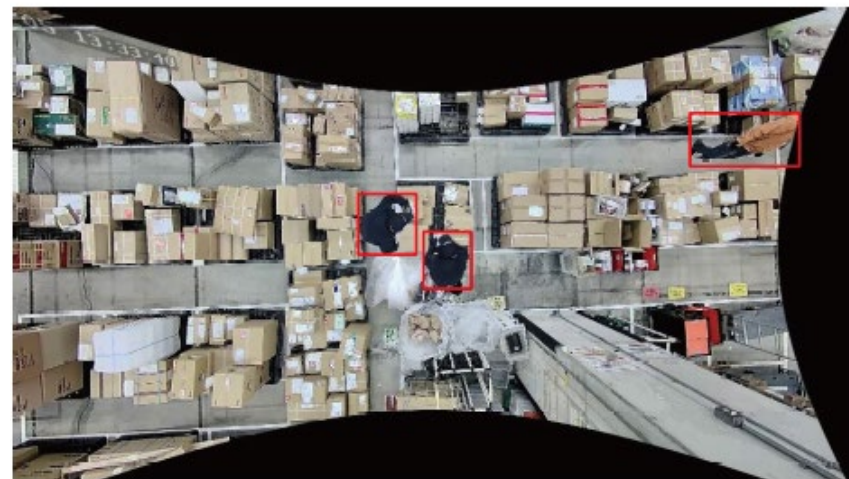
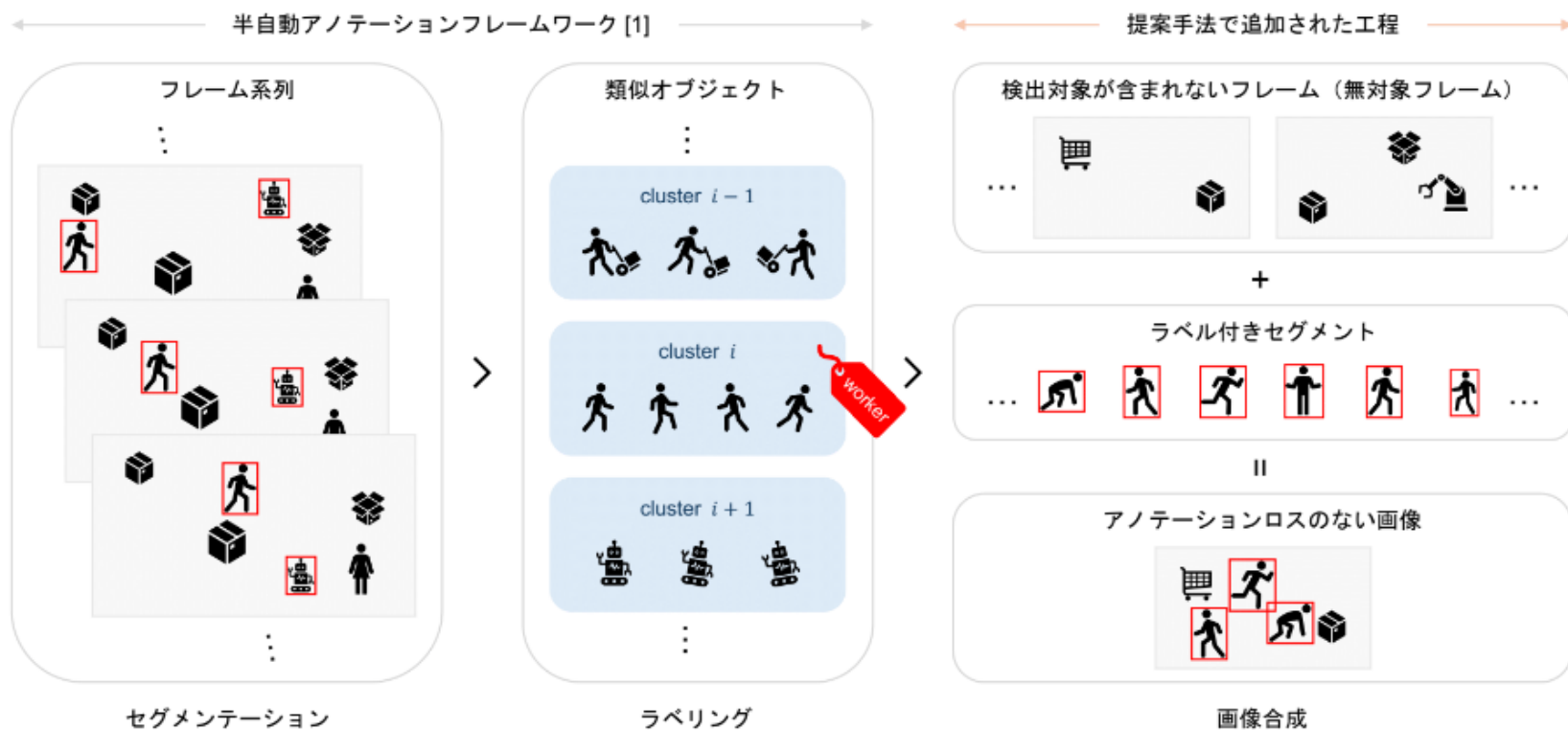


## ゴミ袋



# 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**

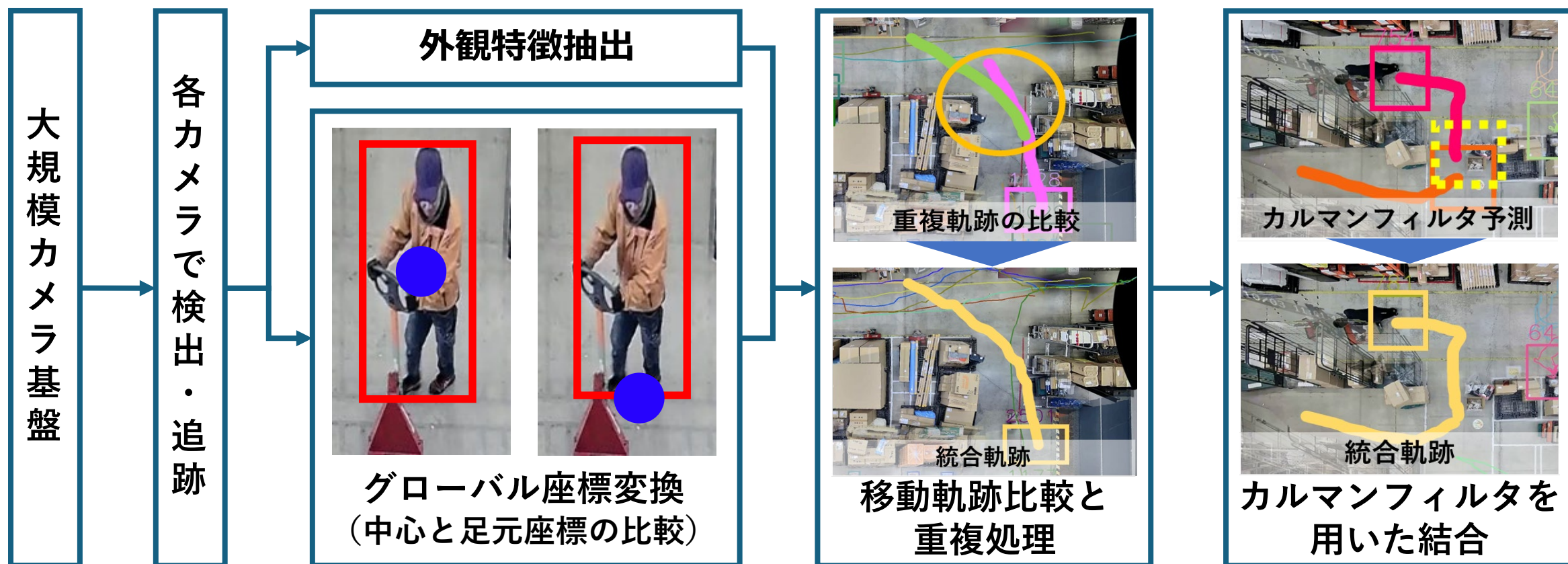


UbiComp2024 Workshop 採択



# 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

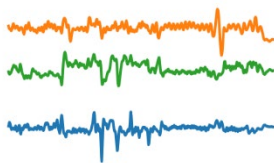
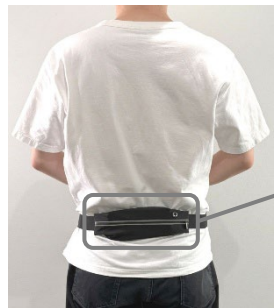
Identification method based on

Correspondence between Video trajectories and Sensors

IPIN2025



Multi-camera video trajectories



Wearable sensor measurements

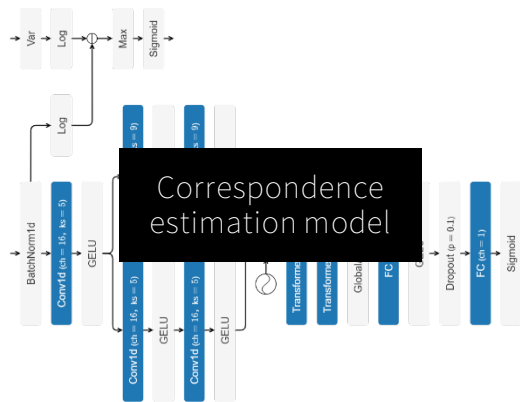
Trajectory features



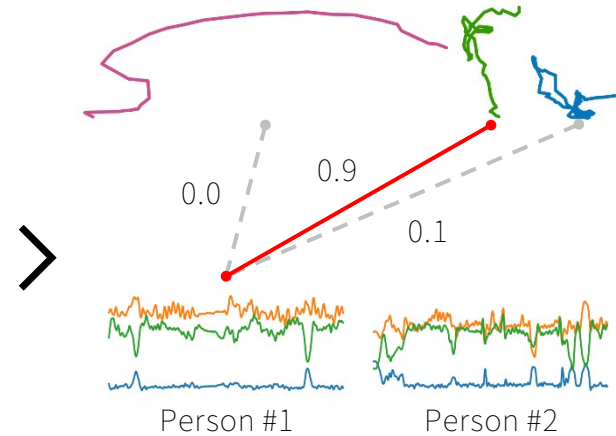
For every  
combo



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 ☐ Track ☐ Info

☐ PalStats ☐ Stack

再生関係

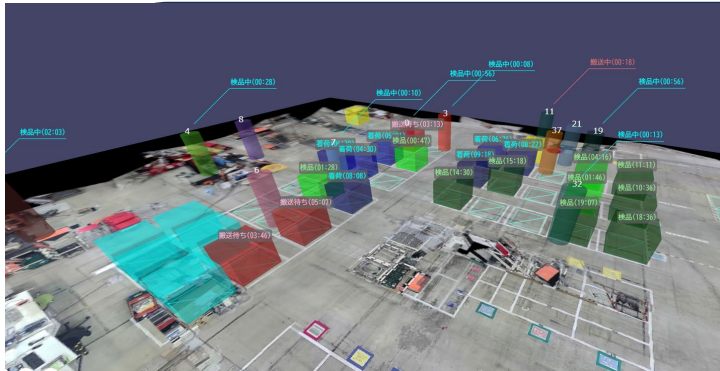
☐ 動画 ☒ 11:00~



VR

# 構築した可視化ツールの概要

## クライアント側



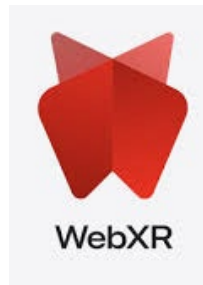
VR ゴーグル  
WebXR 対応  
Webブラウザ



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

WebXR 拡張

ブラウザの  
JavaScript エンジン



## サーバ側

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

Next.js

NEXT.js

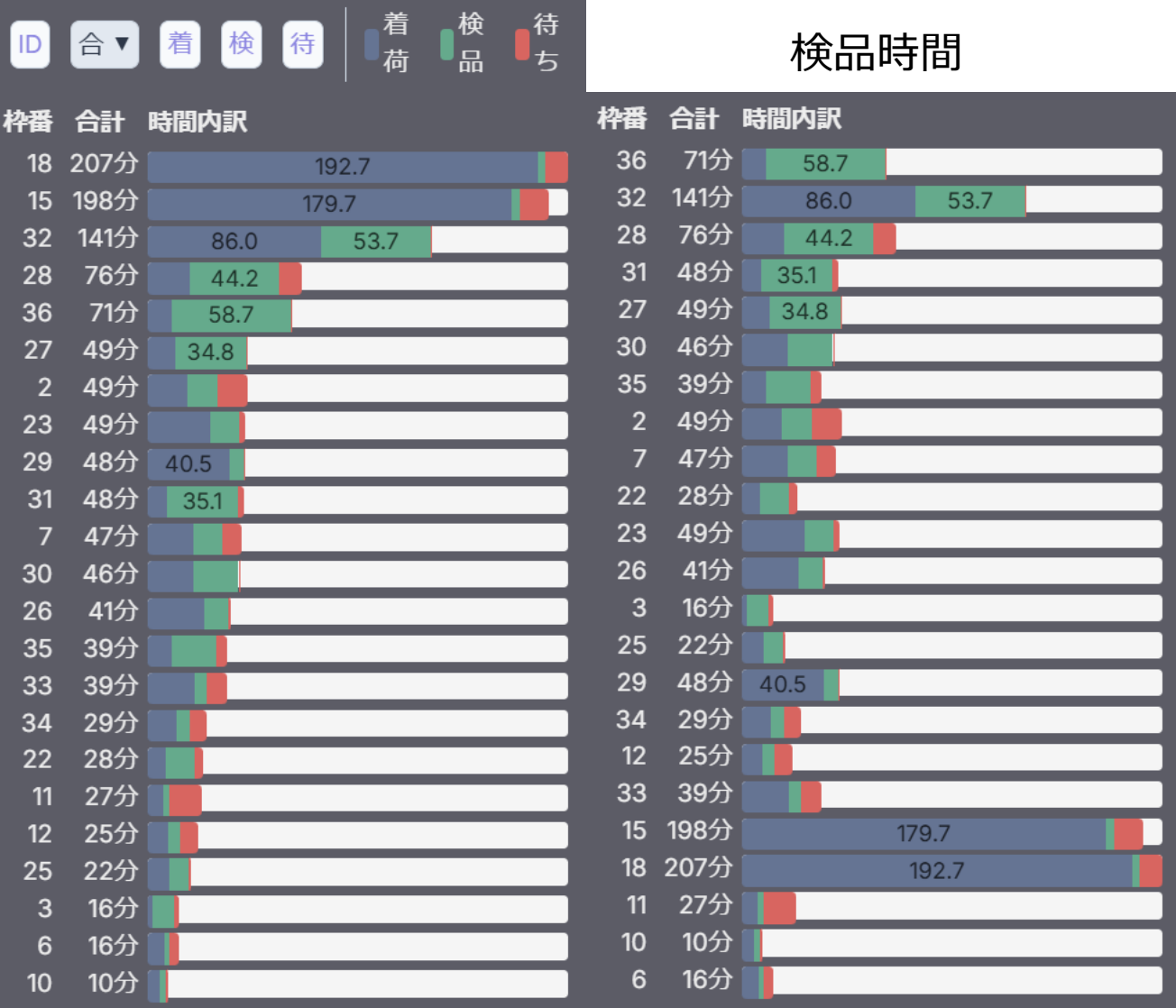
Node.js (20.x~22.x)



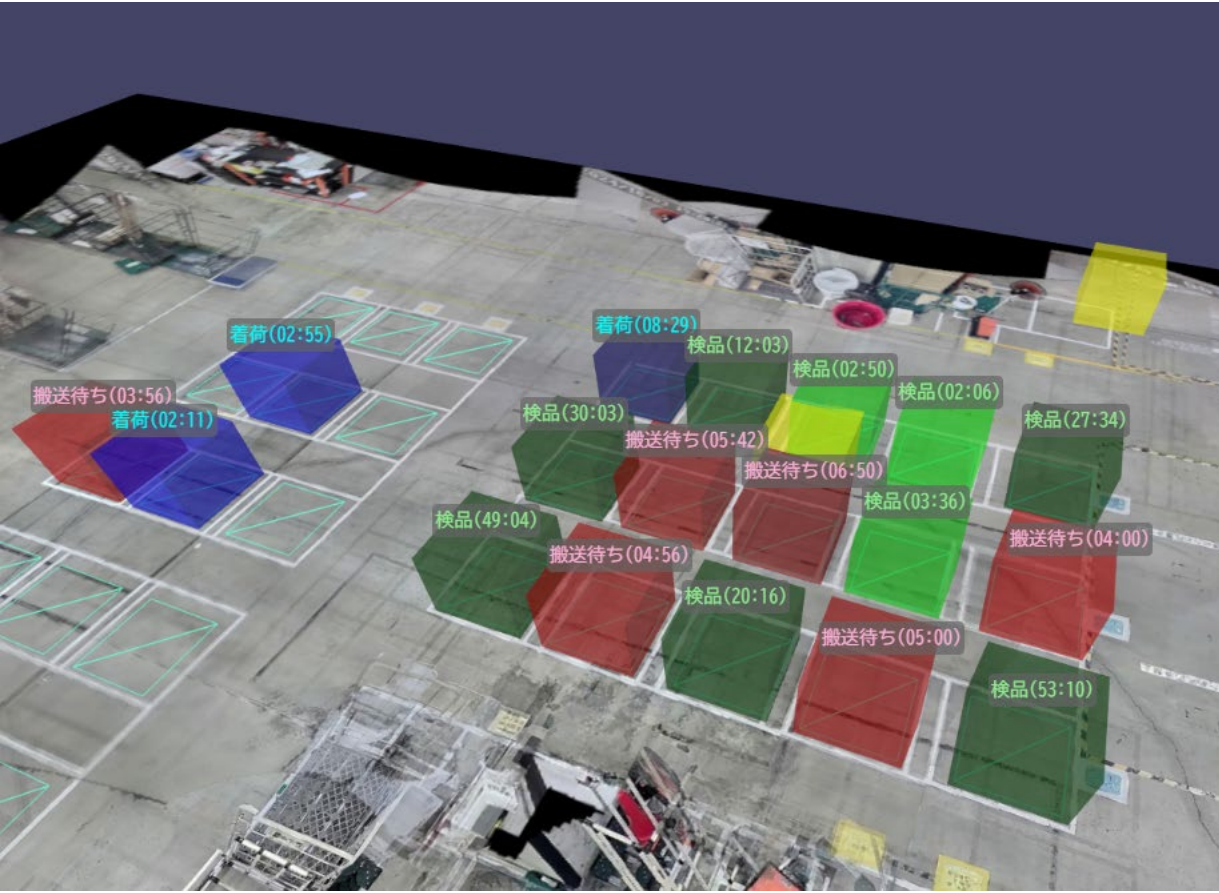


# パレットの停滞状況

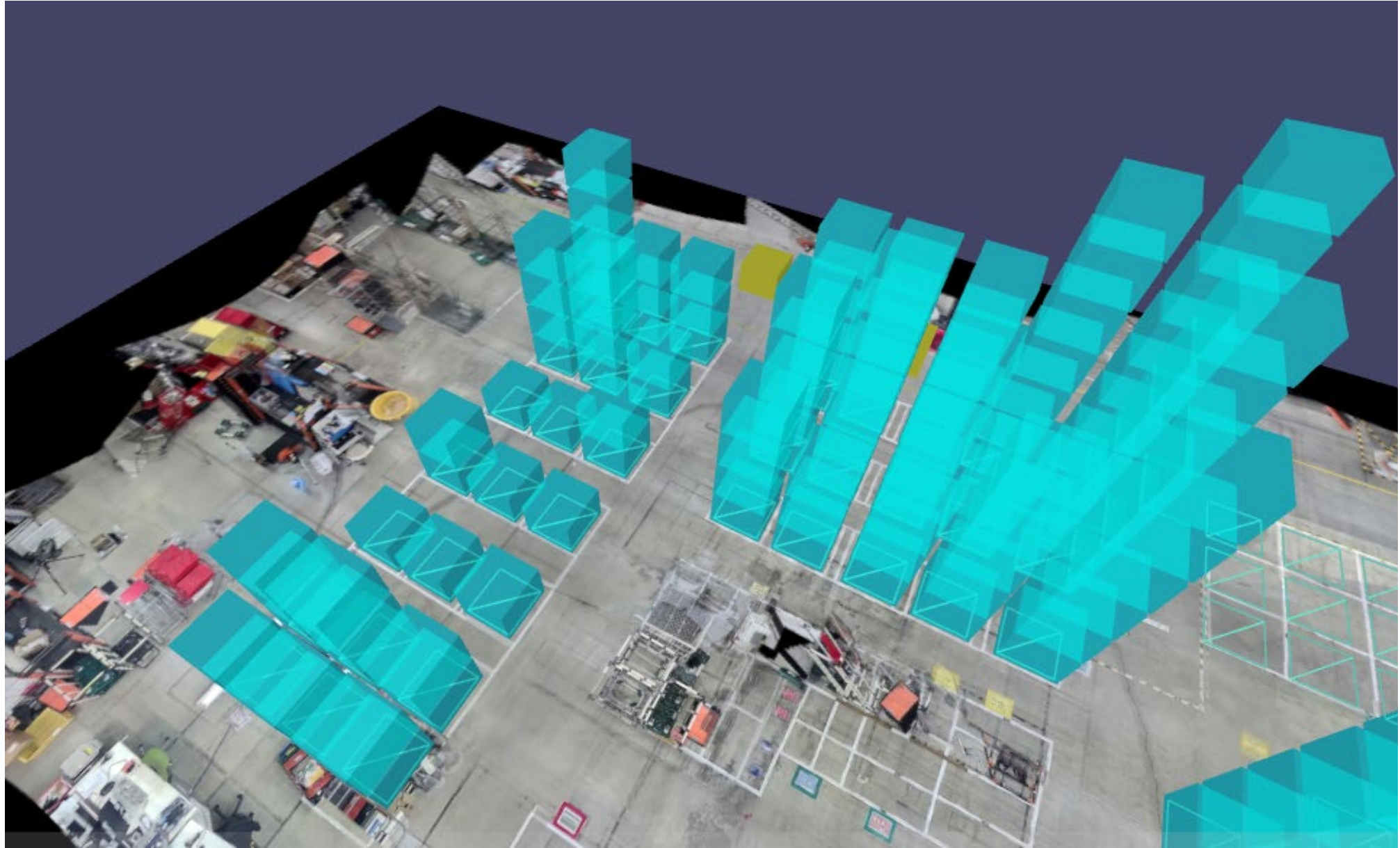
着荷～検品までの時間



可視化システム上でも色+テキストで表示

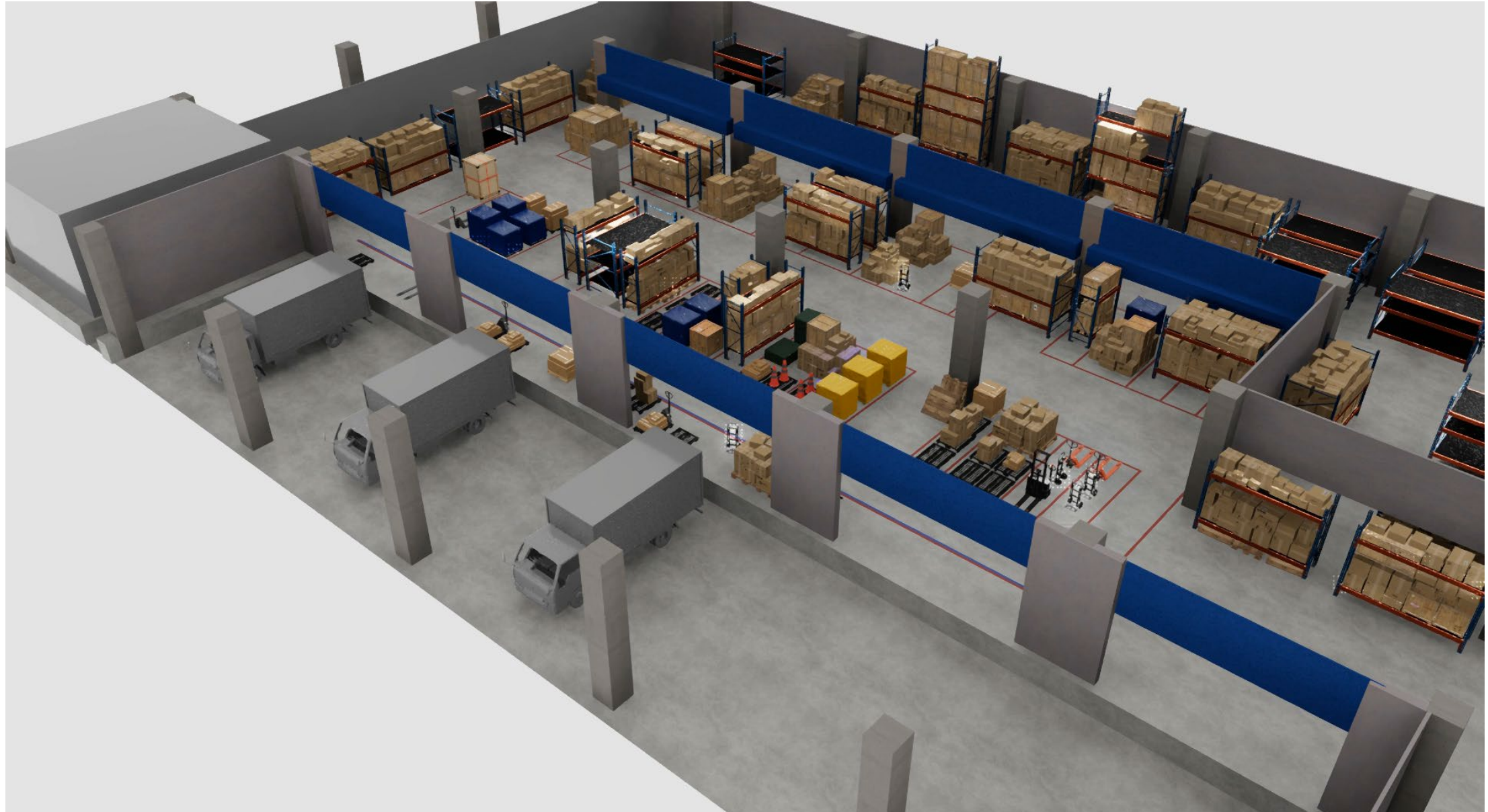


# パレット枠の利用頻度



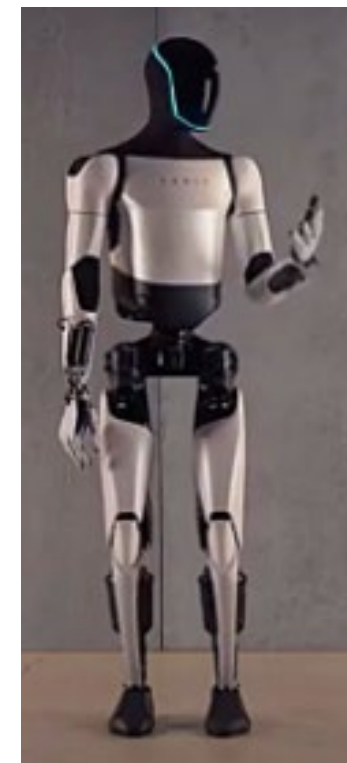


# 倉庫内の3次元モデル⇒デジタルツインへ



# 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



<https://youtu.be/io9VOtRmk6U>

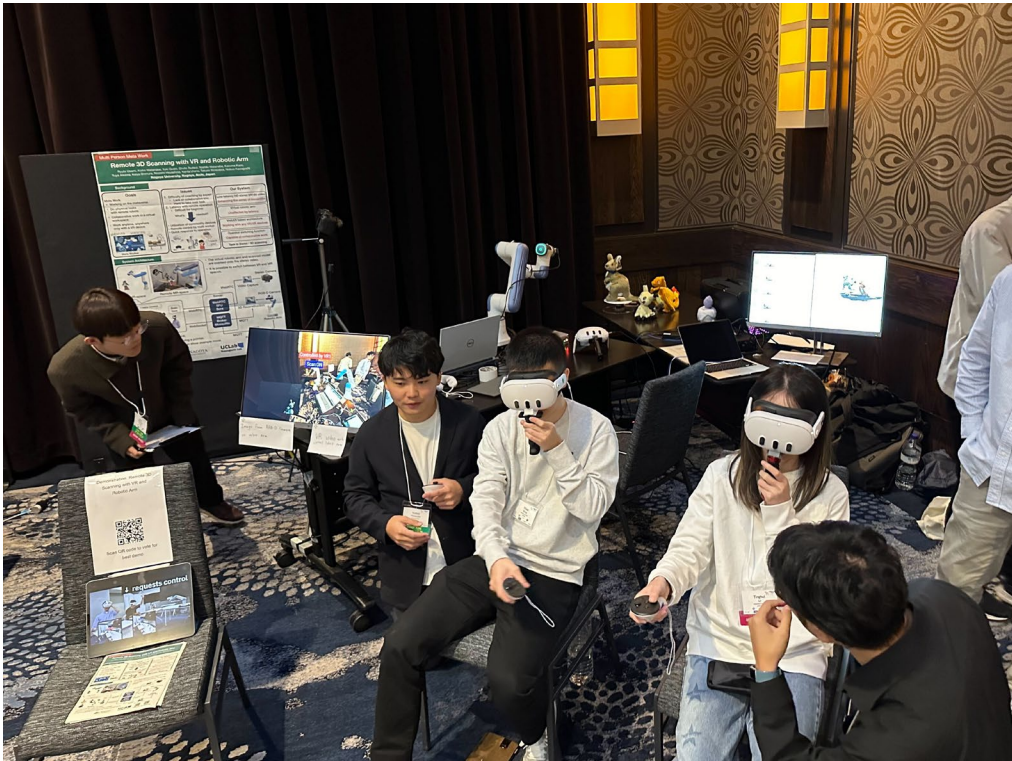


# 国際カンファレンスで、デモ賞を受賞！

- 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

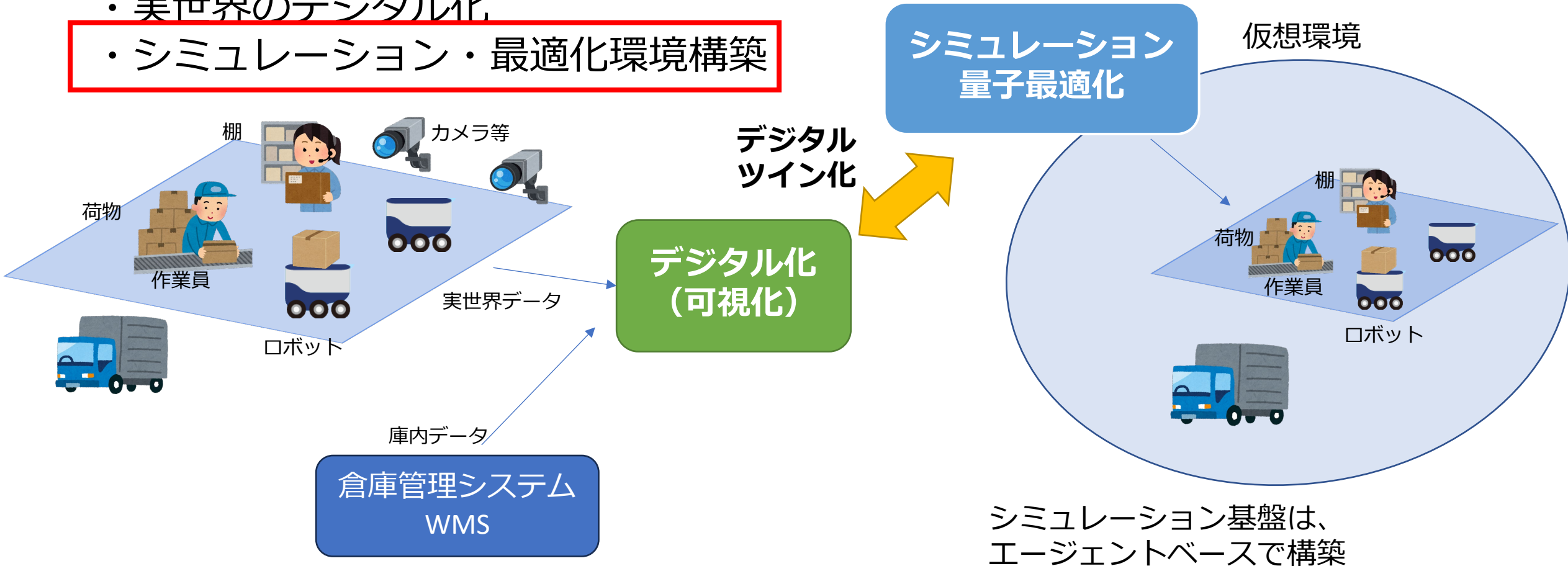
→ 主に外国人研究者含め 80名以上が体験  
16 のデモ中で Best Demo Award !



# 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

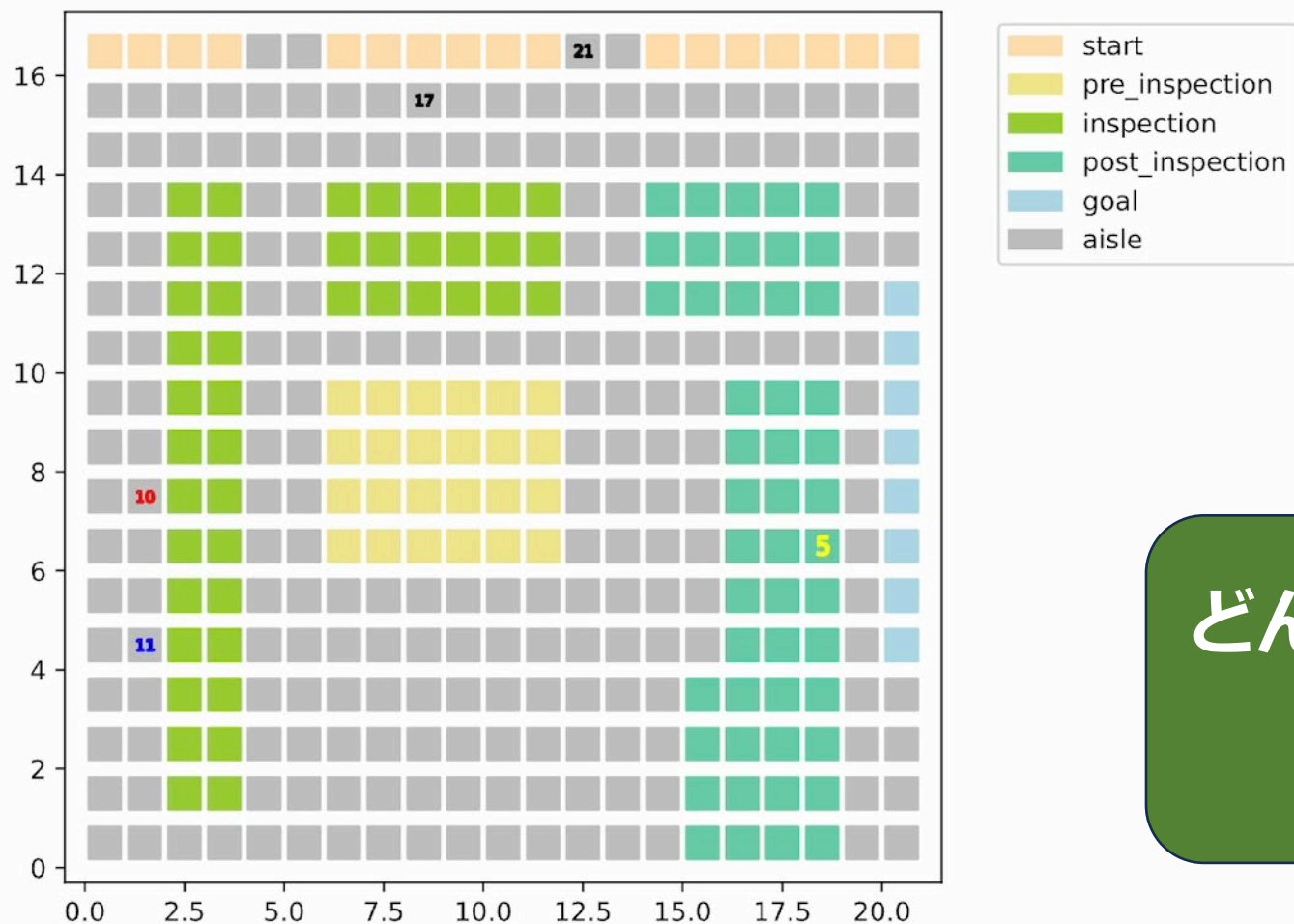
- ・ 実世界のデジタル化
- ・ シミュレーション・最適化環境構築



シミュレーション基盤は、  
エージェントベースで構築



# 倉庫シミュレータの開発

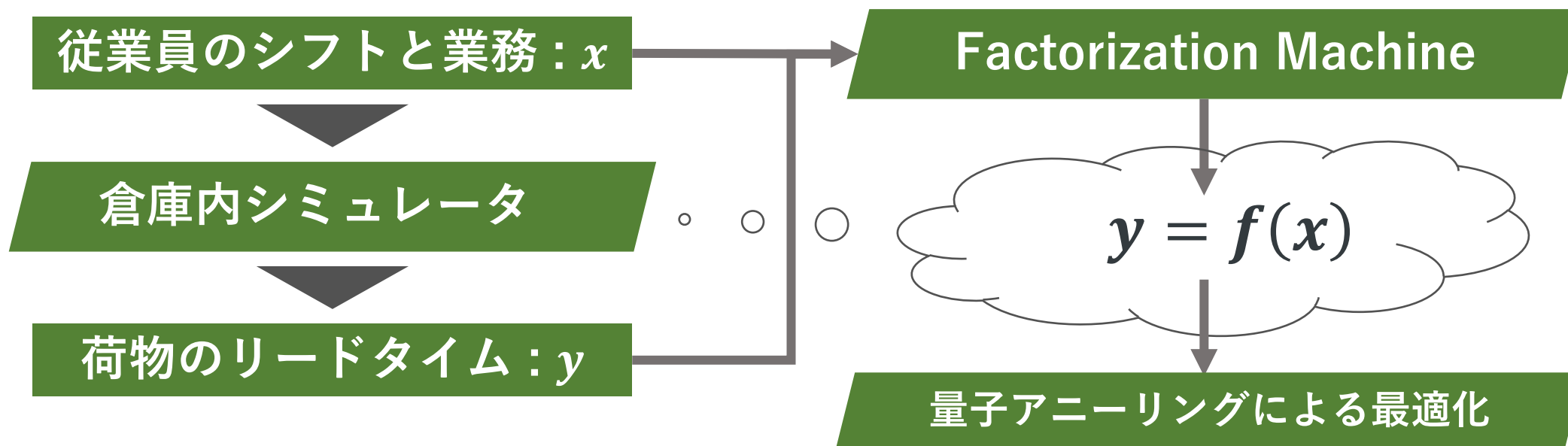


倉庫のレイアウトや、  
作業員のシフトを  
変更して、試行が可能

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

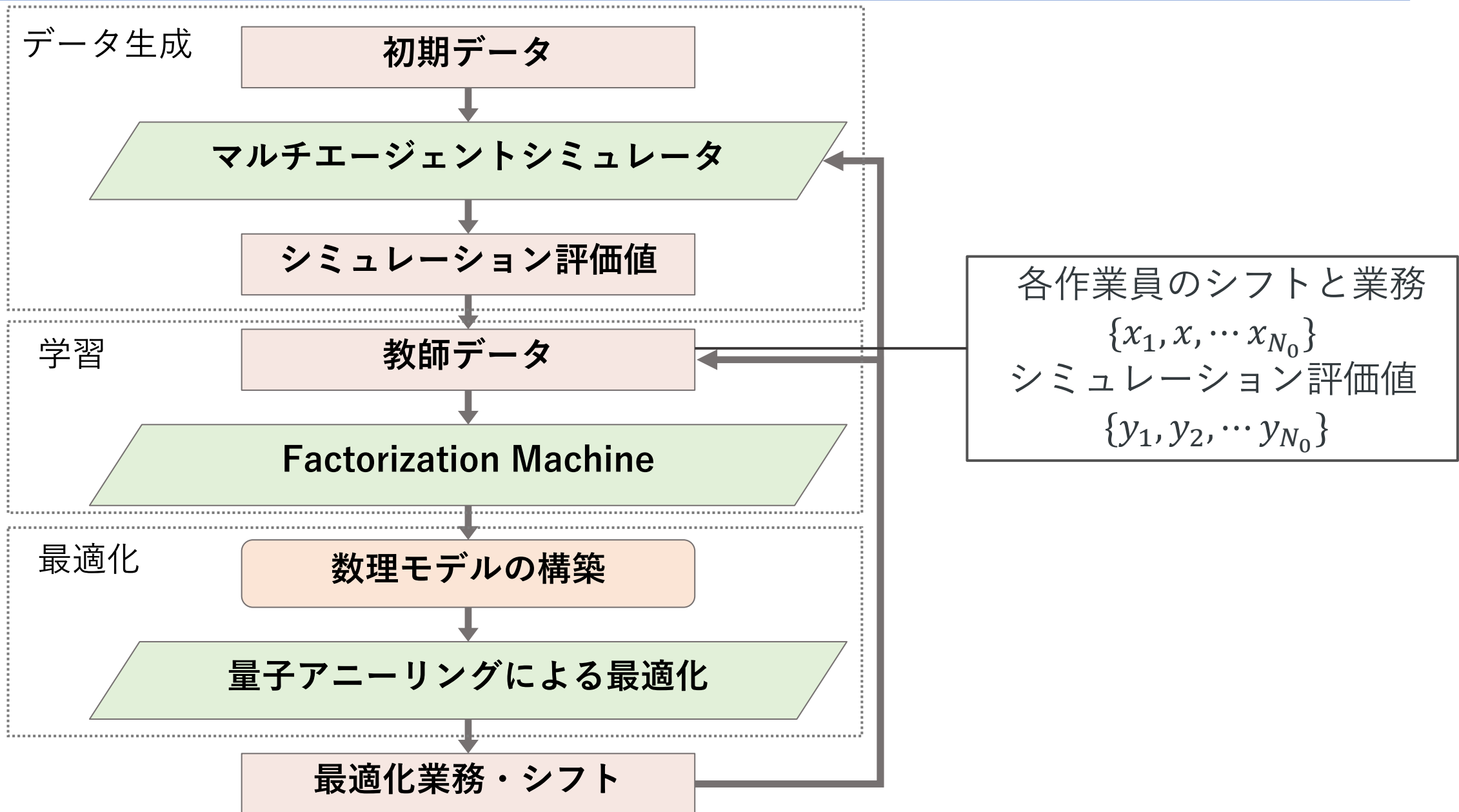
Factorization Machine (FM) と呼ばれる機械学習と、量子アニーリング (QA) による最適化

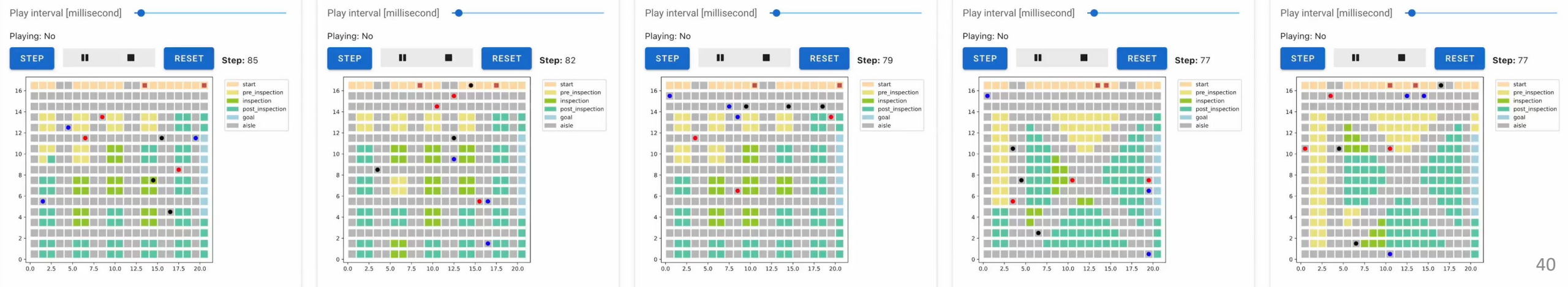
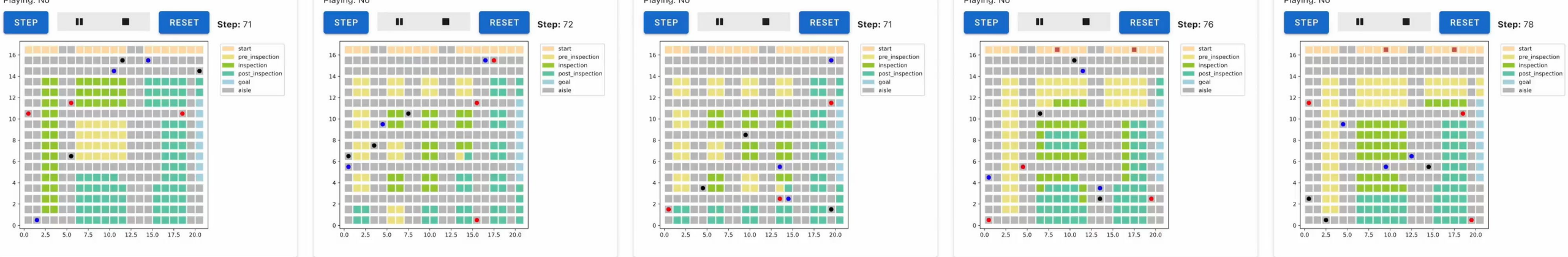


- 倉庫内シミュレータを構築し、入出力を学習
  - $y = f(x)$ に回帰
  - 目的関数が構築されることで最適化が可能



# 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

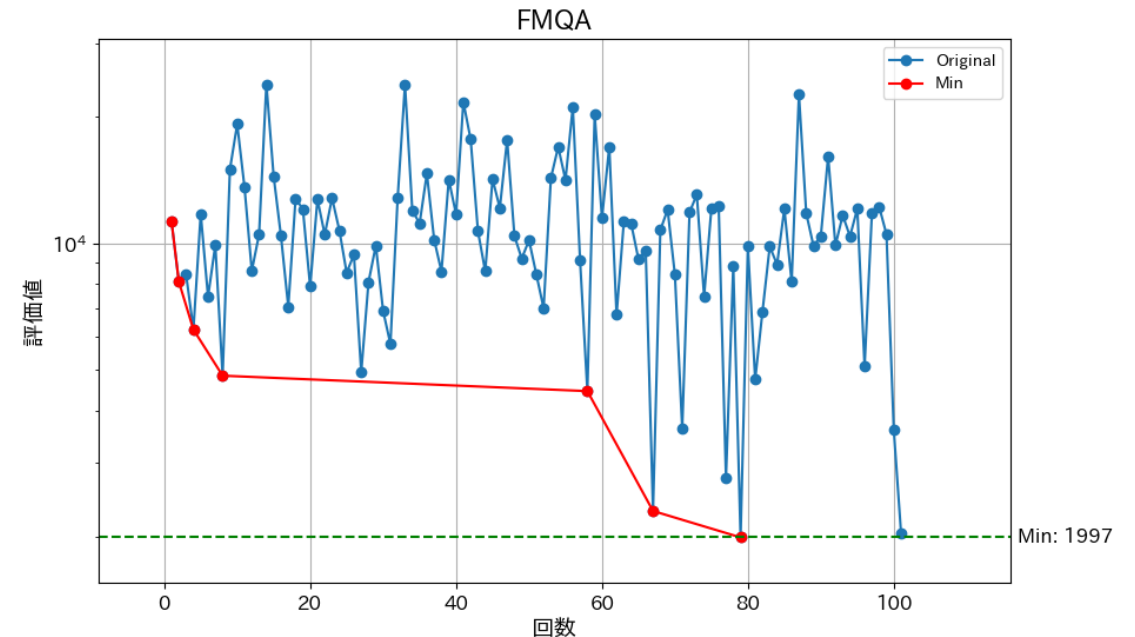
シフト・業務	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	リードタイム	荷物残留数	合計労働時間
現実の倉庫のシフトと業務				1430	55	184
FMQA 1	1	10	1000	997	34	156
FMQA 2	1	5	1000	942	24	164
FMQA 3	1	1	1000	895	2	184

## 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

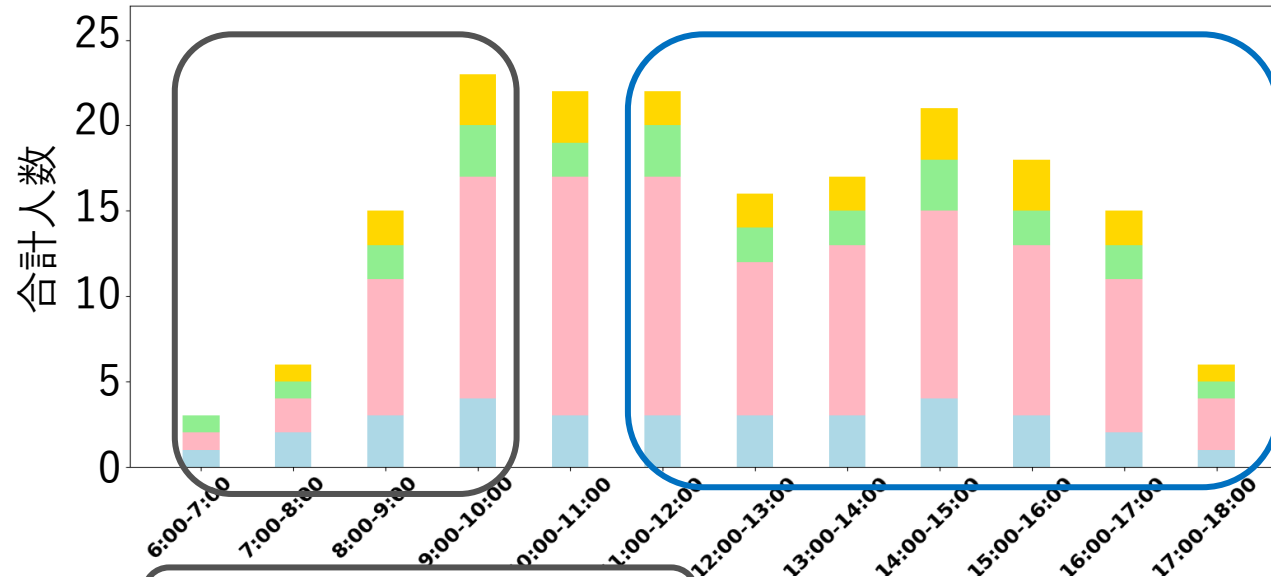
- リードタイムを38%  
荷物残留数を94.5%削減



FMQA<sub>1</sub>の最適化過程

# 最適化結果の検討

現実の倉庫のシフトと業務

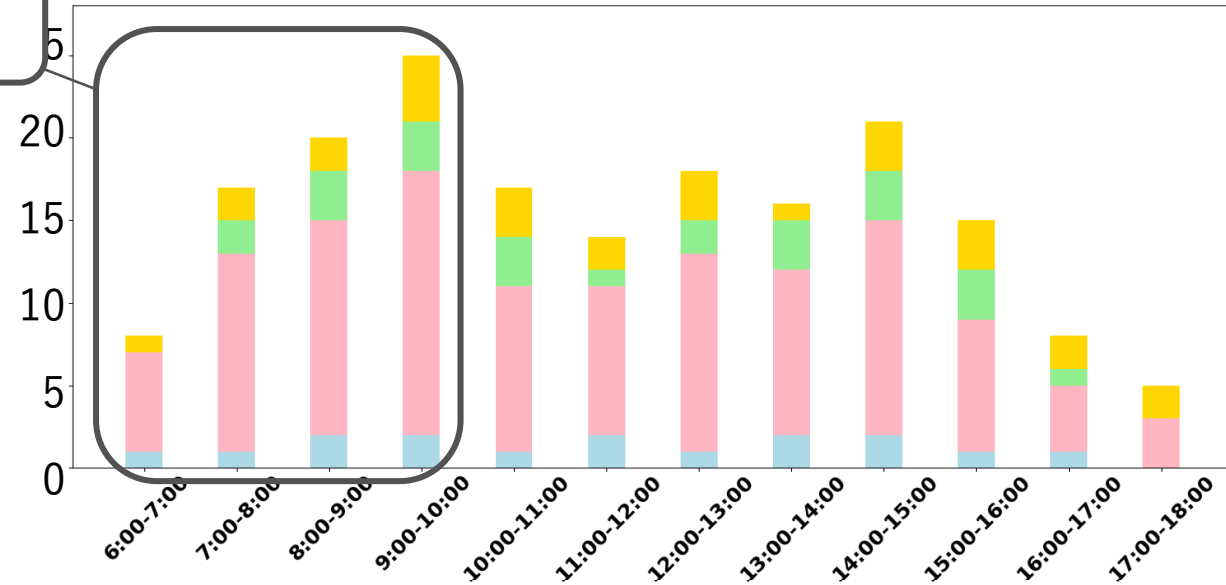
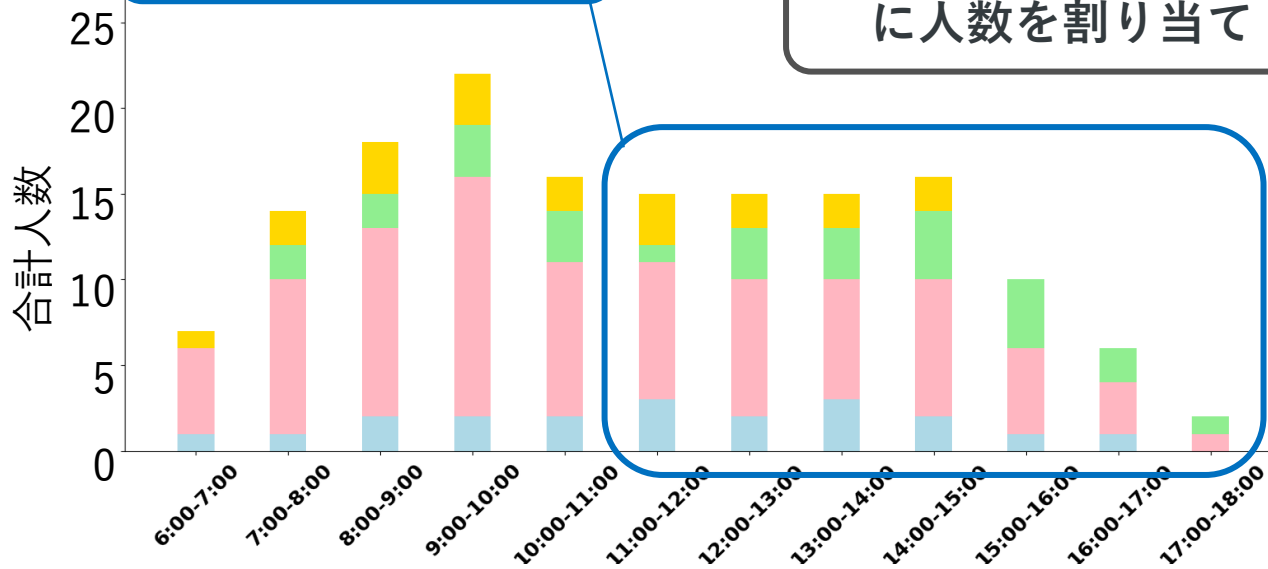


荷物の少ない時間帯  
の作業員数を削減

FMQA 1

早朝と荷物大量入荷時に  
人数を割り当て

FMQA 3





## ◎ カメラ + AIによる天井図面作成支援

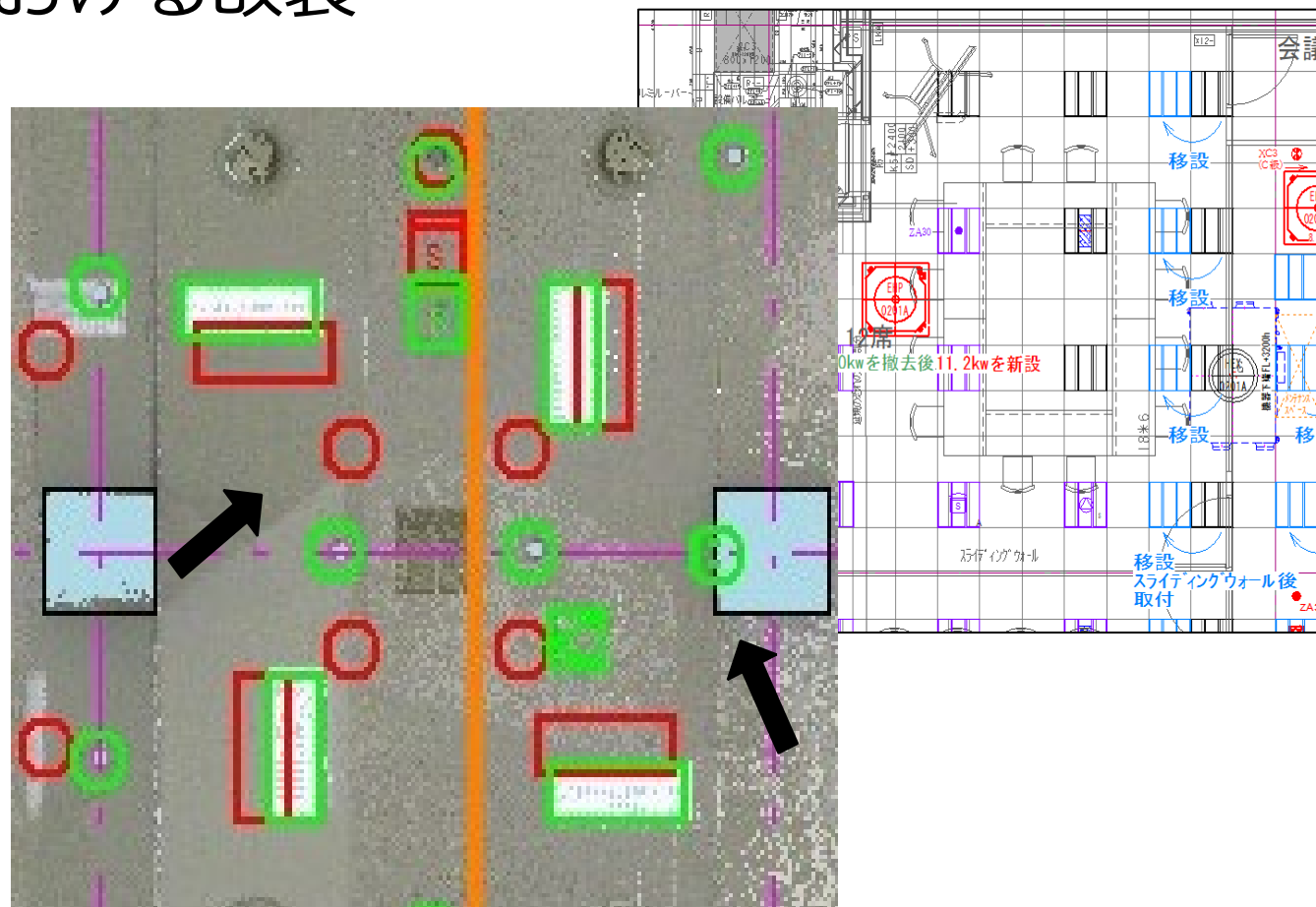
- 電気設備・空調設備などにおける改装

図面が現場と合ってるとは限らない

- 現場の状況を確認する  
手間を削減したい！

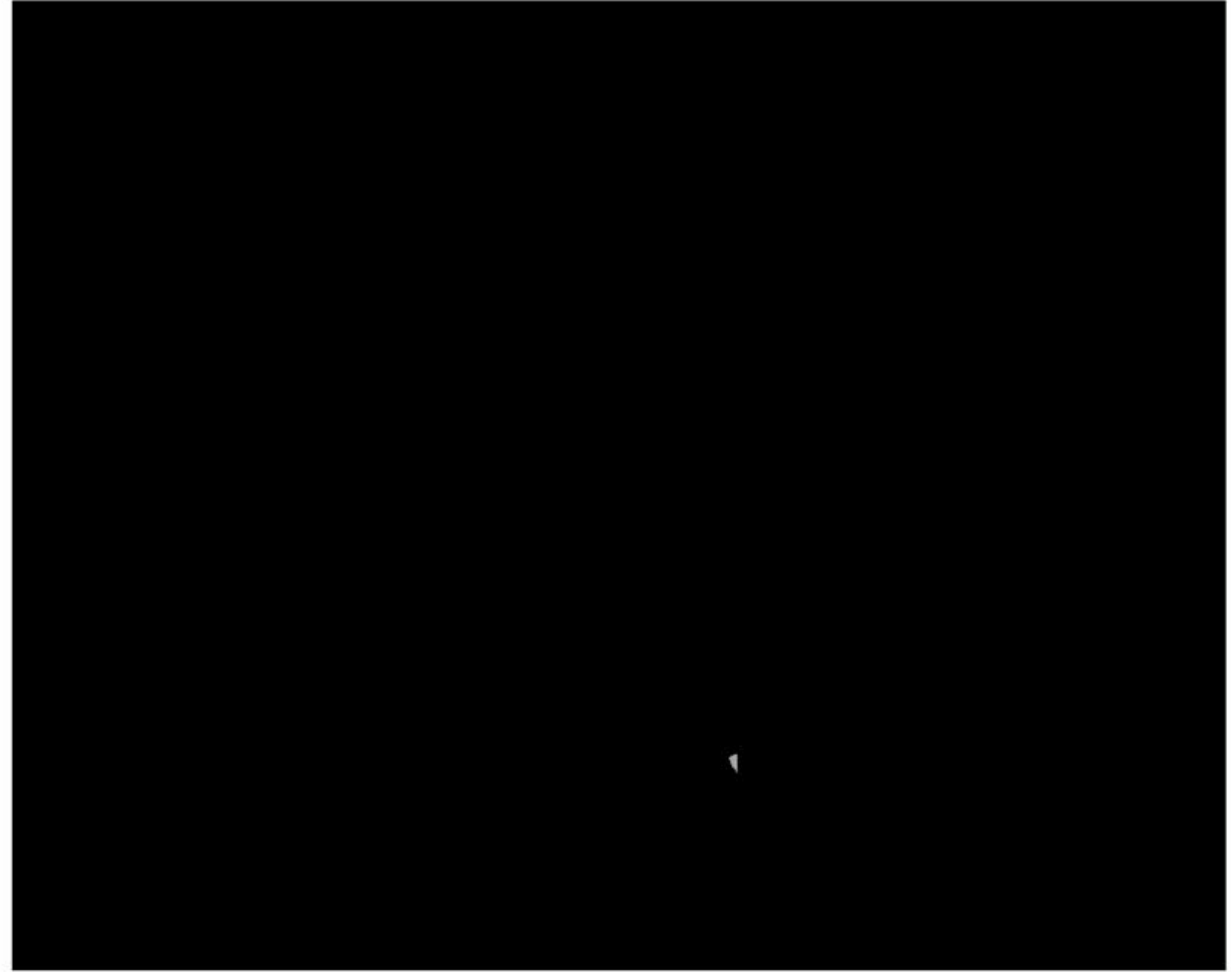


360度撮影可能な  
カメラで簡単に  
できないか？



# 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！





# おわりに



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>

