次世代庫内物流のための デジタルツインと量子最適化



名古屋大学 未来社会創造機構 河口 信夫



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

EC化率 9%超 市場規模 **14兆円**

- 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

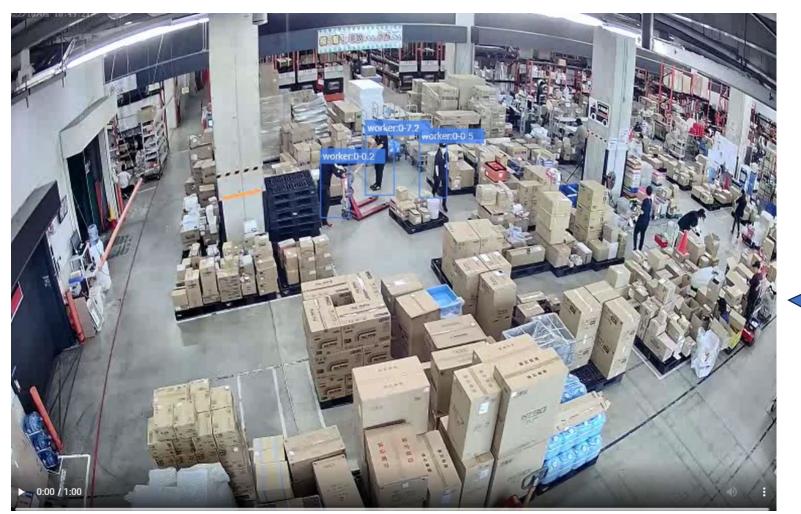
物流クライシス



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)

入出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

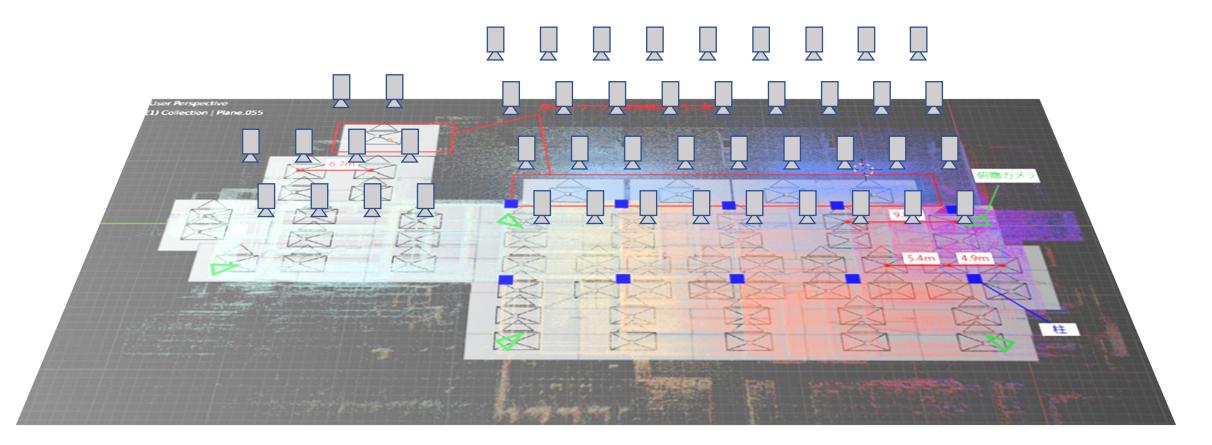




Image Ite

pos_x :-

pos_y:-

pos_z :--

rotate_x :

rotate_y :

rotate_z:

size:-

trim_top:

trim_botto

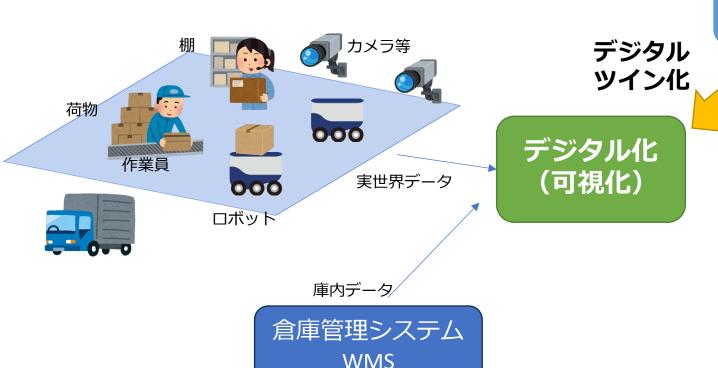
trim_left:

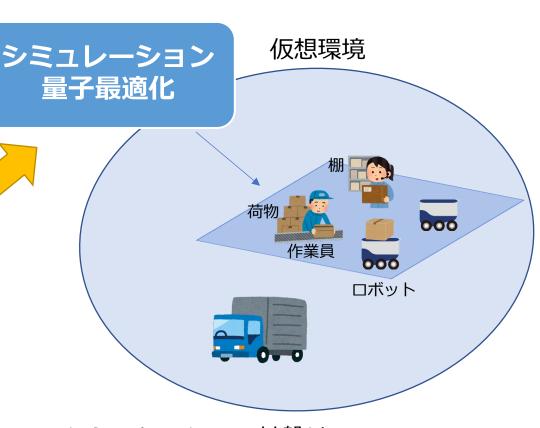
trim_right

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

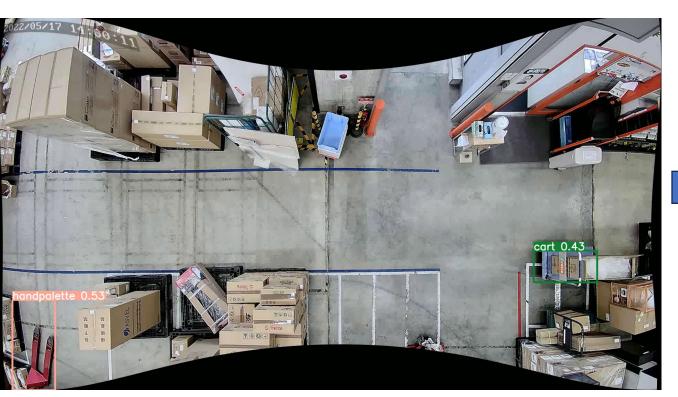




シミュレーション基盤は、 エージェントベースで構築

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)

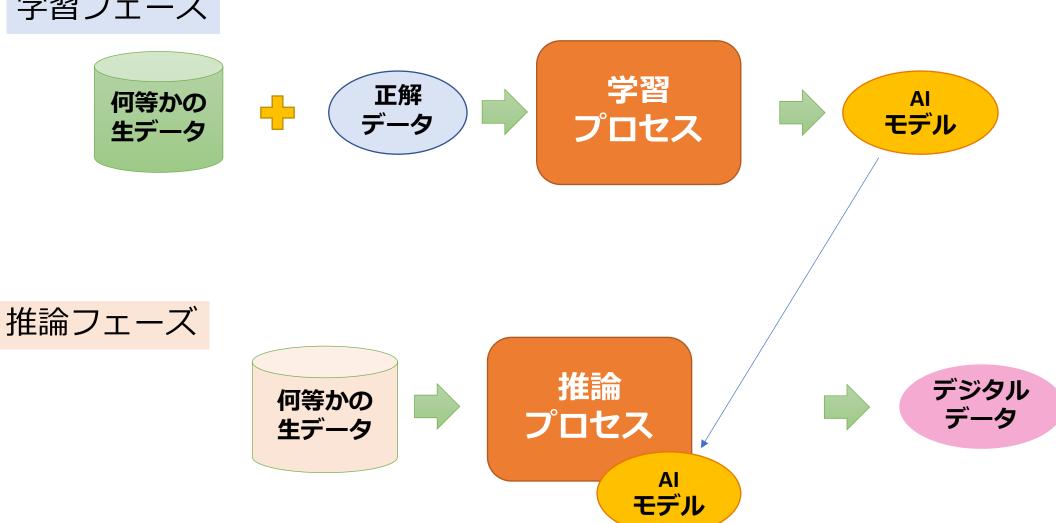






AIモデルの構築

学習フェーズ



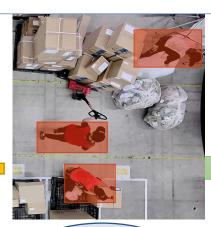
物流倉庫のデジタルツイン構築

学習フェーズ



カメラ データ

> 大規模 ストレージ



正解 ラベル 付け

12万ラベル+ 半自動化 大規模計算機(GPU) + ノウハウ

学習 プロセス

> 失敗を修正 追加



可視化分析

デジタル データ

推論フェーズ



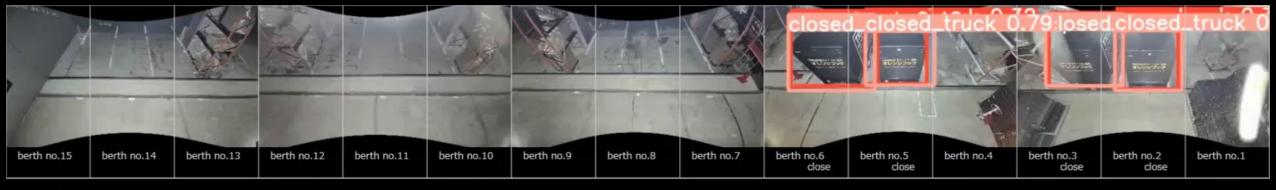
カメラ データ

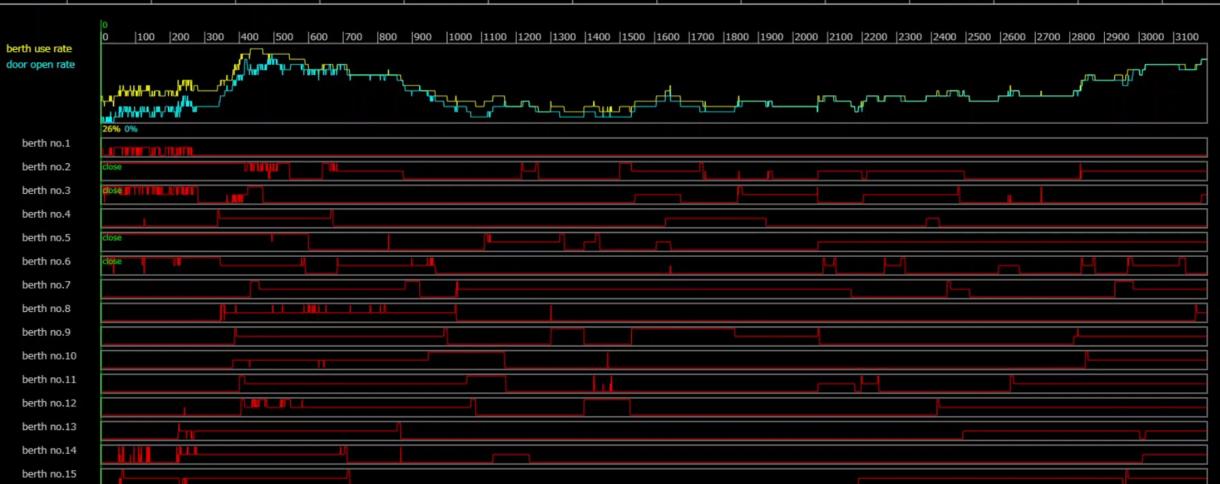


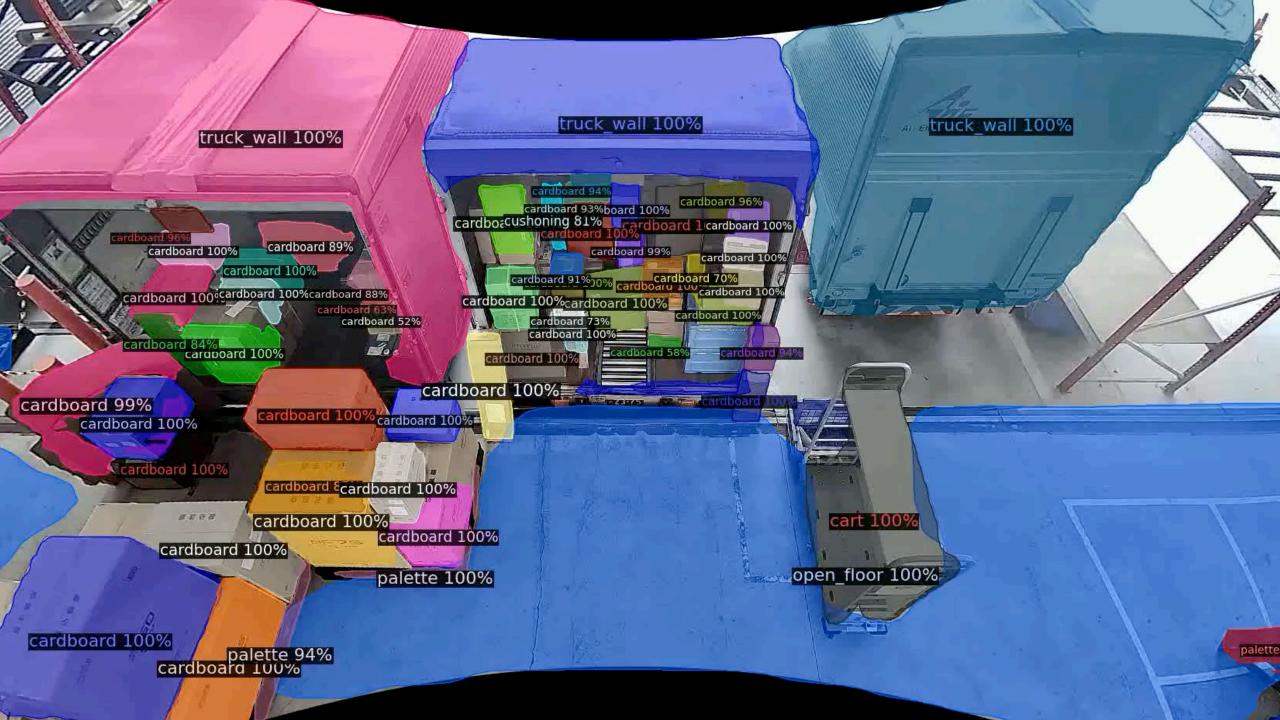
推論 プロセス

> AI モデル









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 2024/11/28



cage trolley



flat trolley



handpallet



packed cart



cart 修十論文発表会



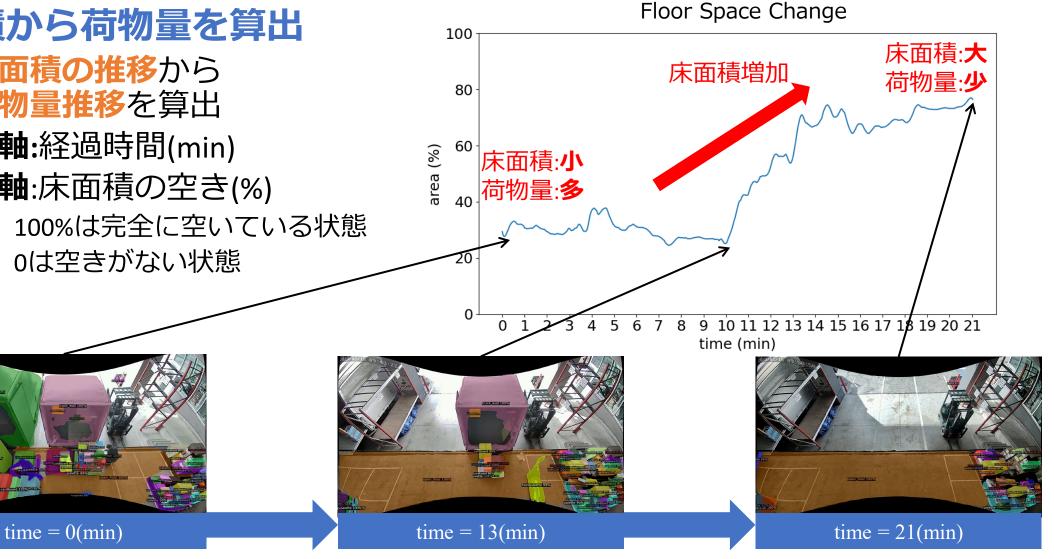
packed container

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

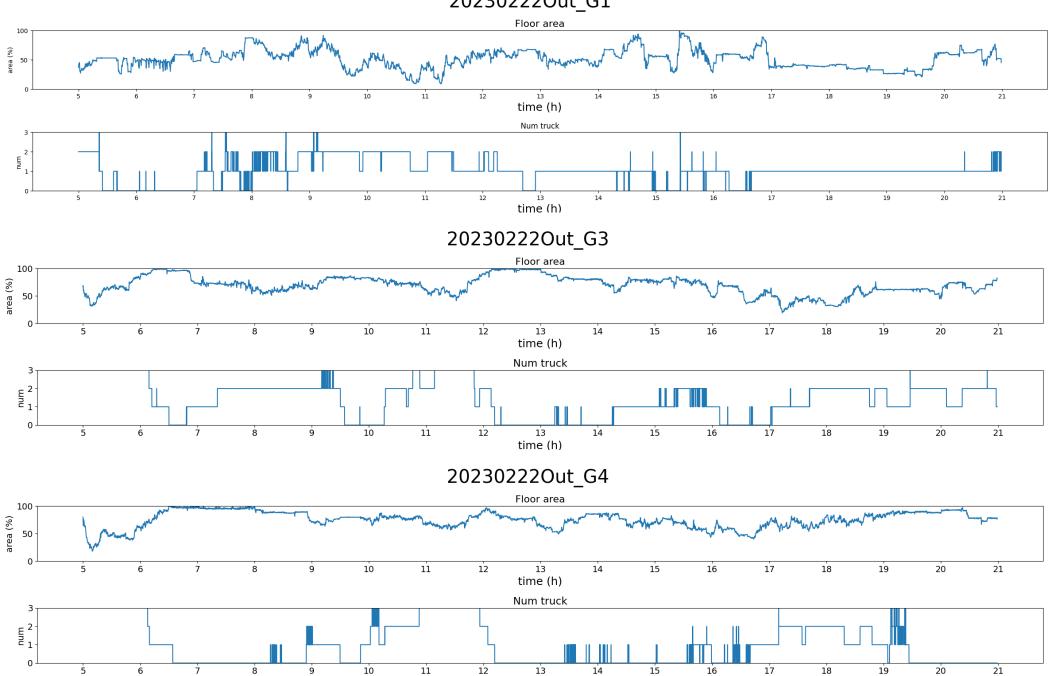
荷物量の算出

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

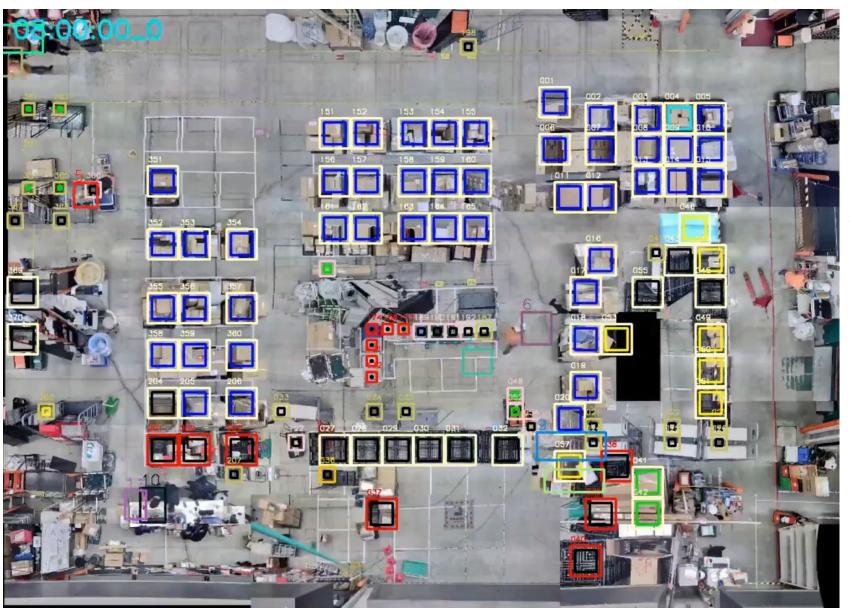


20230222Out_G1



time (h)

デジタル化の途中状況



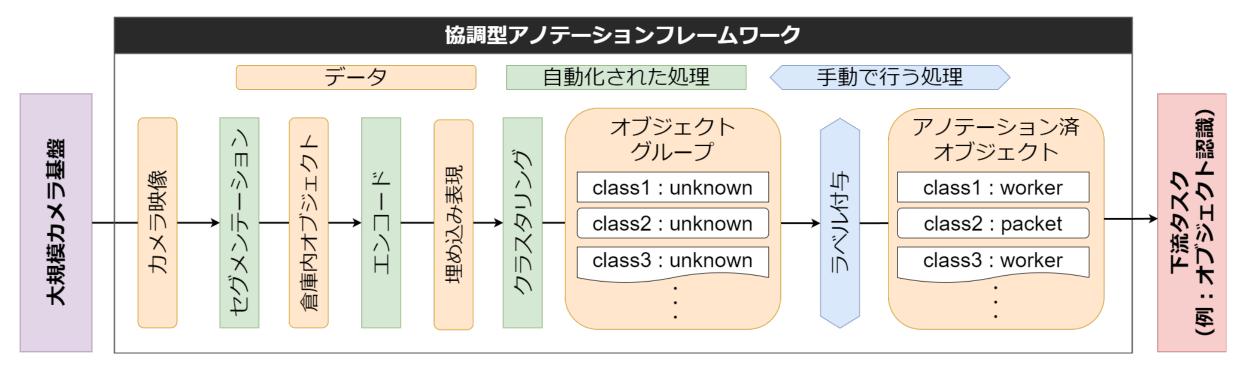
2023年12月に取得した 動画をデータ化

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

協調型アノテーション 手動のアノテーション Class ID: 10 - Class Name: unknown E Q 101% Q ;; ♠ ♠ ~ ~ ¼ ♠ » ⊨ ⊗ ⊗ 🗈 < 🗏 🖾 タヴ F すべてを表示 アノテーションクラス ■ 作業員 ■ ハンドバレット ☐ Exclude ☐ Exclude ☐ Exclude ■ パレット(荷物無) ■ パレット(縦) ■ パレット(荷物多) アノテーション(16) □ Exclude ☐ Exclude □ Exclude □ Exclude □ Exclude ■ ハンドパレット v @ : v @ : v : □ Exclude ■ パレット (荷物少) ∨ ◎ 1 □ Exclude □ Exclude □ Exclude ■ パレット(荷物多) ∨ ◎ : ■ パレット (荷物多) 🗸 🔘 🚦 ■ バレット(荷物多) ∨ ◎ : ■ パレット(荷物多) ∨ ◎ : ☐ Exclude ☐ Exclude □ Exclude ☐ Exclude ■ パレット(荷物少) ∨ ◎ : ■ パレット (荷物多) ∨ ◎ : ■ パレット(荷物多) ∨ ◎ : ■ パレット(荷物多) ∨ ◎ : ■ ケージトロリー ∨ ◎ : ☐ Exclude ☐ Exclude □ Exclude □ Exclude ケージトロリー v @ : ■ 6輪カート v @ : 2段カート v @ : □ Exclude □ Exclude □ Exclude ☐ Exclude □ Exclude ☐ Exclude Exclude □ Exclude

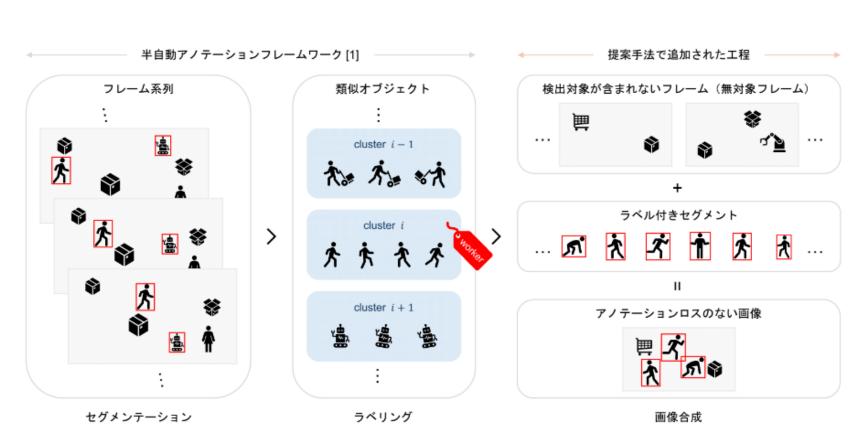
協調型アノテーションの有効性

• 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**



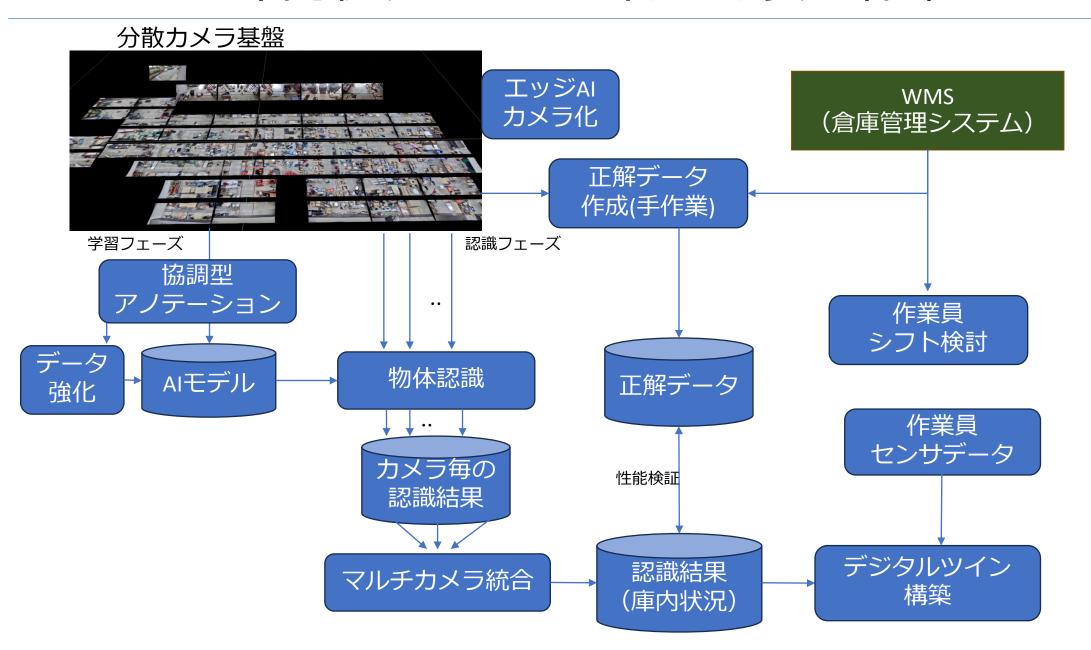




UbiComp2024 Workshop 採択



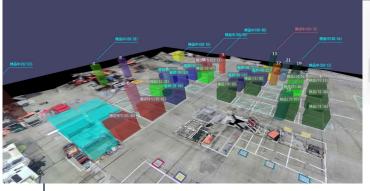
庫内状況のデータ化に必要な作業





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



JavaScript by React/A-Frame/Three.js

Next.js

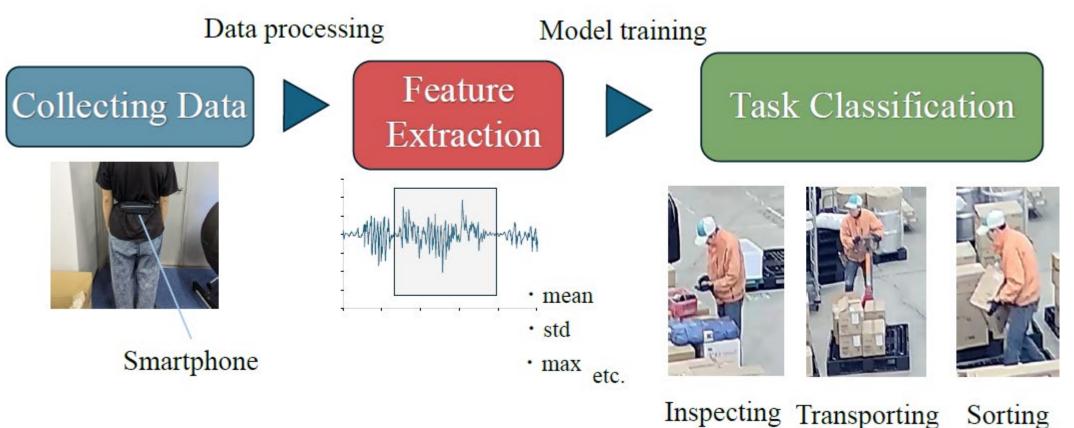


Node.js (20.x~22.x)



センサによる行動・タスク認識

物流倉庫におけるスマートフォンを用いた作業者のタスク認識



Sorting

Sorting Transporting Inspecting 0.5 -0.5 -1 -1.5 24 10 12 14 16 18 20 22 26 Time [min]

Linear acceleration (z-axis) [G]

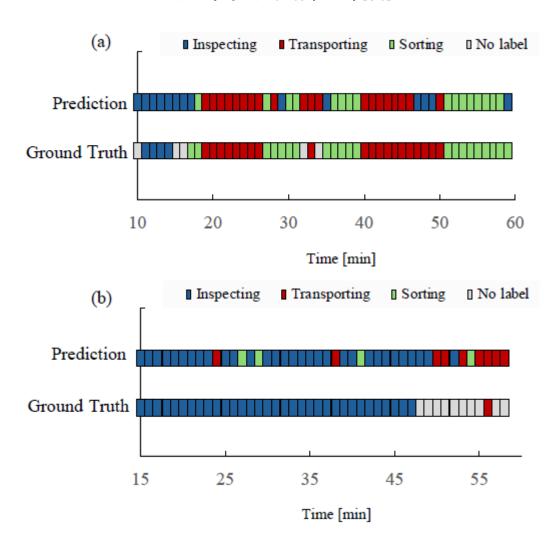
True label

Predicted label

	Inspecting	Transporting	Sorting	Recall
Inspecting	336	24	24	0.88
Transporting	29	214	18	0.82
Sorting	5	14	101	0.84
Precision	0.91	0.85	0.71	0.83

タスク認識結果

ロジスティック回帰を利用



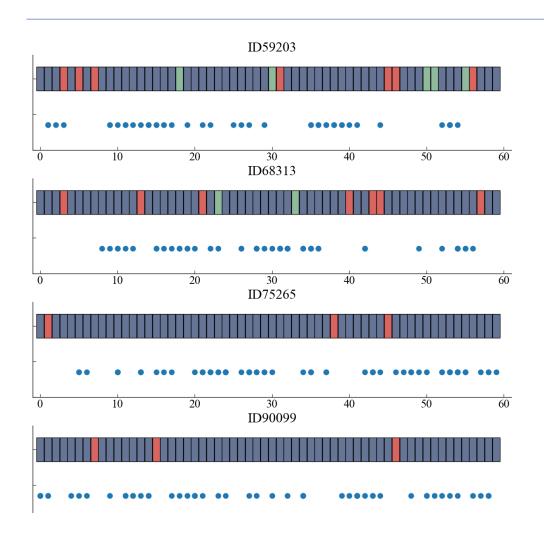
2024 10/3の検品作業ログー

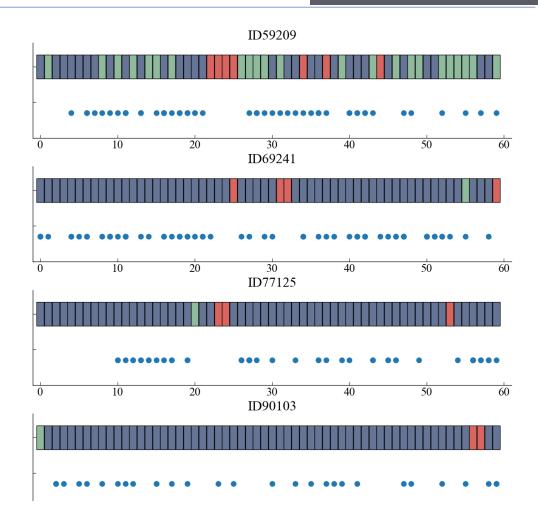
倉庫管理システム(WMS)からのデータも統合

作業	▼ 端末	マ 作業者コー	▼ 作棄者名	▼ 作業日時 -↑ 品目		▼ 表示品目	▼ 名称漢字
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:46 THPT158552S	8000	THPT15-85-52S	TRUSCO ハンドバレットトラック 1.5t用 L850
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:48 AR3407	1428	AR-3407	アラオ マグネットボード A3 (Wマグネット)
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:48 NO8200	7057	NO8200	メイホー トレンディNO、8200
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:48 C274008UST	2101	C274-008U-ST	コンドル 水拭き用モップ ネオカラーモップ #8 (糸付)
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:48 W20	4050	W-20	TRUSCO 精製水 20L (1個入)
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:48 VSH1	8000	VS-H1	TRUSCO V型ツールワゴン用1段引出し 大
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:49 ACC800X1200X428	A 7037	ACC800X1200X42M	ミナ 気泡緩衝材 エアーキャップ ロール品 (MP401S新
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:49 MAT297	6296	MAT297	pig ピググリッピーマンモスグリーンマット 30m (10
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:49 110005855	4338	110005855	TENMA プレクシーケースM クリアナチュラル 300×4
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:49 TPHW30A	8037	TPHW-30A	TRUSCO 自由ほうき (パイプ柄) 30CM 幅330mm
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:49 RC1220BR	4235	RC1220BR	タカギ ホースリール BOXY NEXT 20m (BR)
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:49 60570	2048	60570	クレシア ワイプオールX70 4つ折り
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:50 TDBE10	8037	TDBE-10	TRUSCO デッキブラシ PVC毛 竹柄 幅180X長さ
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:50 YGP6	4050	YGP-6 (6KG)	TRUSCO ユーゲルパウダー 6kg
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:50 M345	8000NG	M3-45 NG(M3.M5371140X450MM)	TRUSCO スチール製中量ポルトレス個用棚板 M3型・M
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:51 M365	8000NG	M3-65 NG(M3.M5391740X450MM)	TRUSCO スチール製中量ポルトレス相用相板 M3型・M
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:51 BL13C	1256	BL-13-C (209486)	IRIS 226370 バックル式コンテナ 450×295
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:52 CF3	6046	CF-3	ピカ 上わく付き路台CF型3段
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:52 61402	2048	61402	クレシア キムタオル ホワイトボップアップ ツイン (614)
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:52 AFA1	8000	AF-A1	TRUSCO 作業用踏台 アルミ製 アジャスター付 高さの
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:53 SLA1111NB	8000	SLA-1111N-B	TRUSCO 樹脂パレット 片面4方差 1100X1100
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:53 301NS	8000	301NS	TRUSCO プレス製台車 ドンキーカート 折りたたみ式9
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:53 60732	2048	60732	クレシア キムテックス タオルタイプ ブルー
出荷検品	HT	22815	配送社員15	2024/10/3 4:53 21000698	1339	21000698	エリエール エルヴェールペーパータオル エコスマート200
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:53 BR531000UMB	2101	BR531-000U-MB	コンドル 自由等ハード 1本柄タイプ
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:54 KCT10	2289	KCT-10	カメダ コルゲートチューブ 50m
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:54 KCT15	2289	KCT-15	カメダ コルゲートチューブ 25m
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:54 KCT05	2289	KCT-05	カメダ コルゲートチューブ 50m
出荷検品	HT	22908	白井 (派遣08)	2024/10/3 4:55 9004150	6023	900-4-150	ハンマー ハンマーロック 900-4
出荷検品	HT	22908	白井 (派達08)	2024/10/3 4:55 STP430	1469	STP430	JEJアステージ ステップ430 ミカゲ
出荷検品	HT	22908	白井 (派達08)	2024/10/3 4:56 MPK780BK	8000	MPK-780-BK	TRUSCO 樹脂台車 カルティオ (新型) 780X4904

作業員の作業状況を統合可視化







作業者の作業割合推定(センサ情報から)

移動距離



検品



搬送

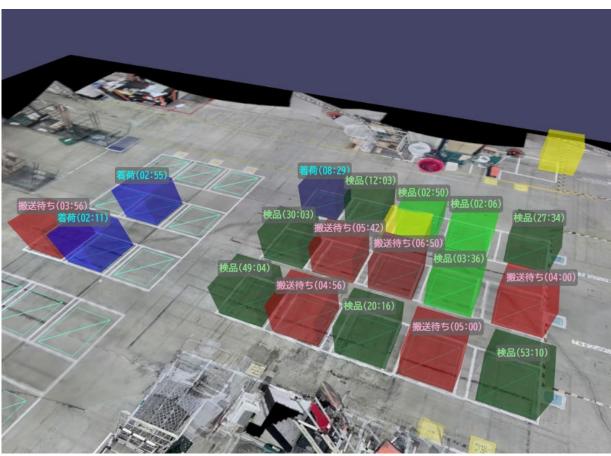


パレットの停滞状況

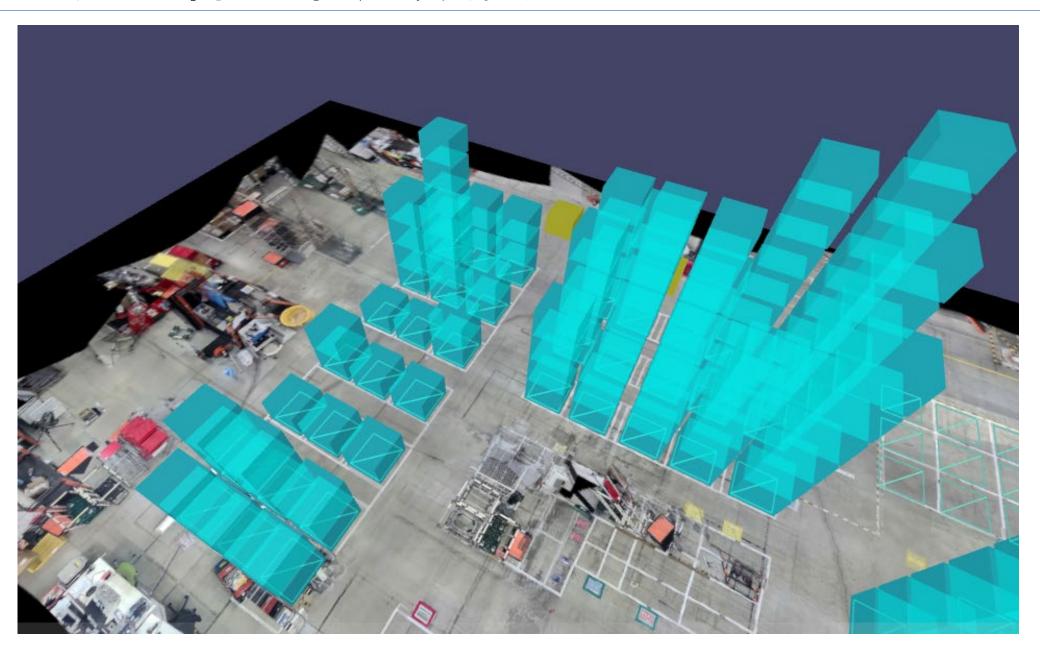
着荷~検品までの時間



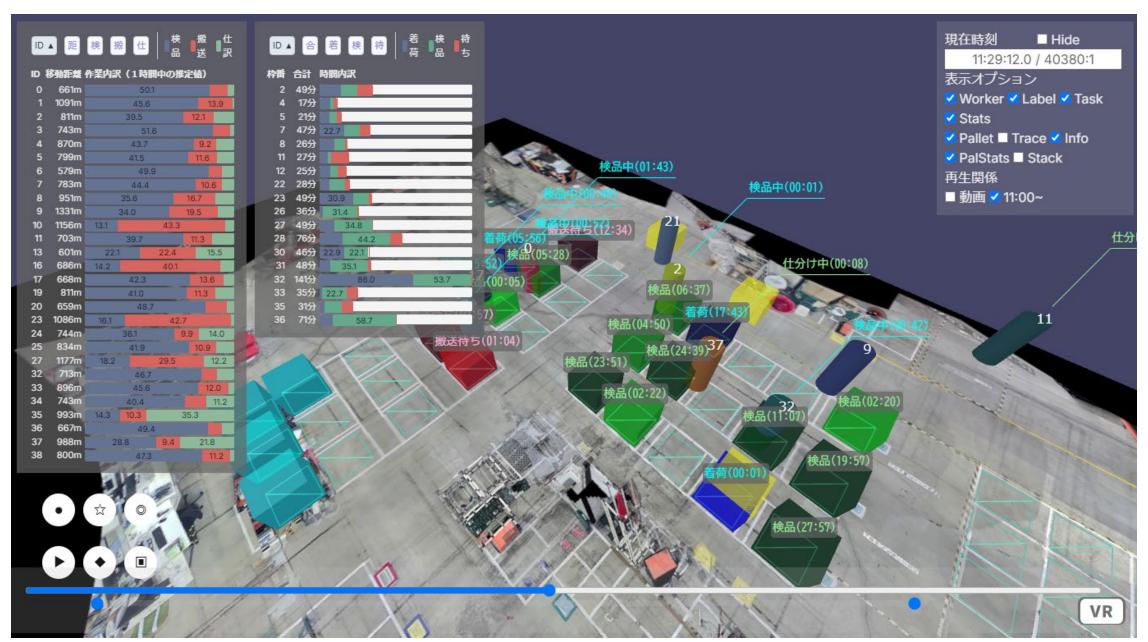
可視化システム上でも色+テキストで表示



パレット枠の利用頻度



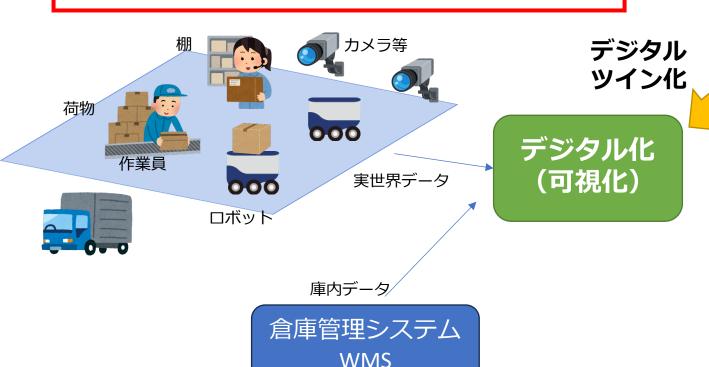
ツール全体の説明

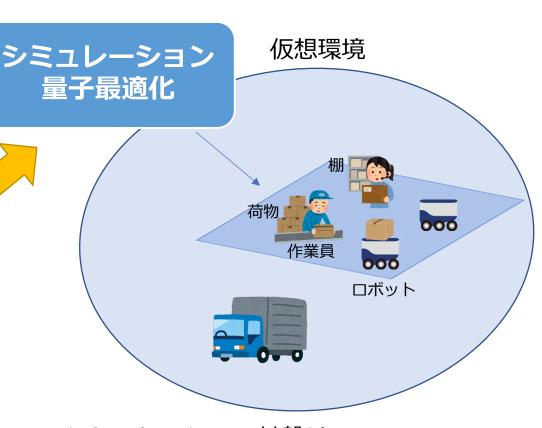


デジタルツイン研究開発コンセプト

2つの方向からのアプローチ

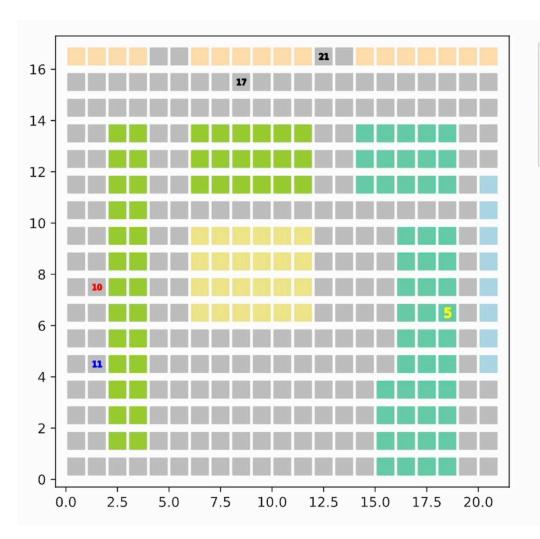
- ・実世界のデジタル化
- ・シミュレーション・最適化環境構築





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



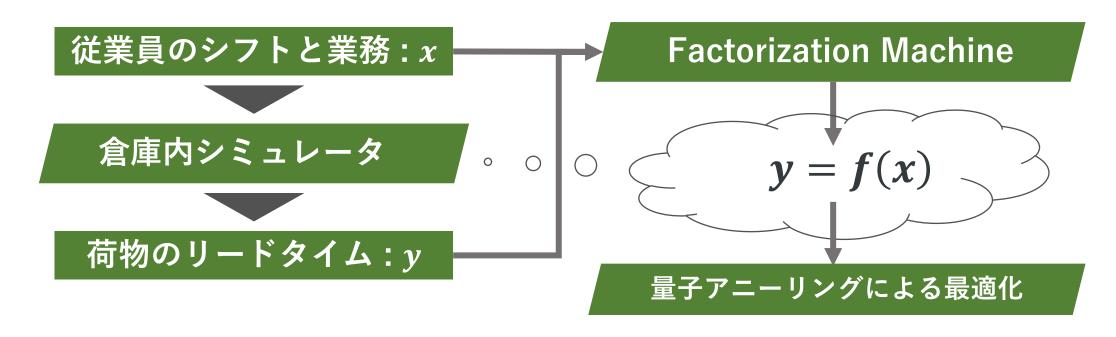


倉庫のレイアウトや、
作業員のシフトを
変更して、試行が可能

どんなレイアウト、シフトに すれば最適?

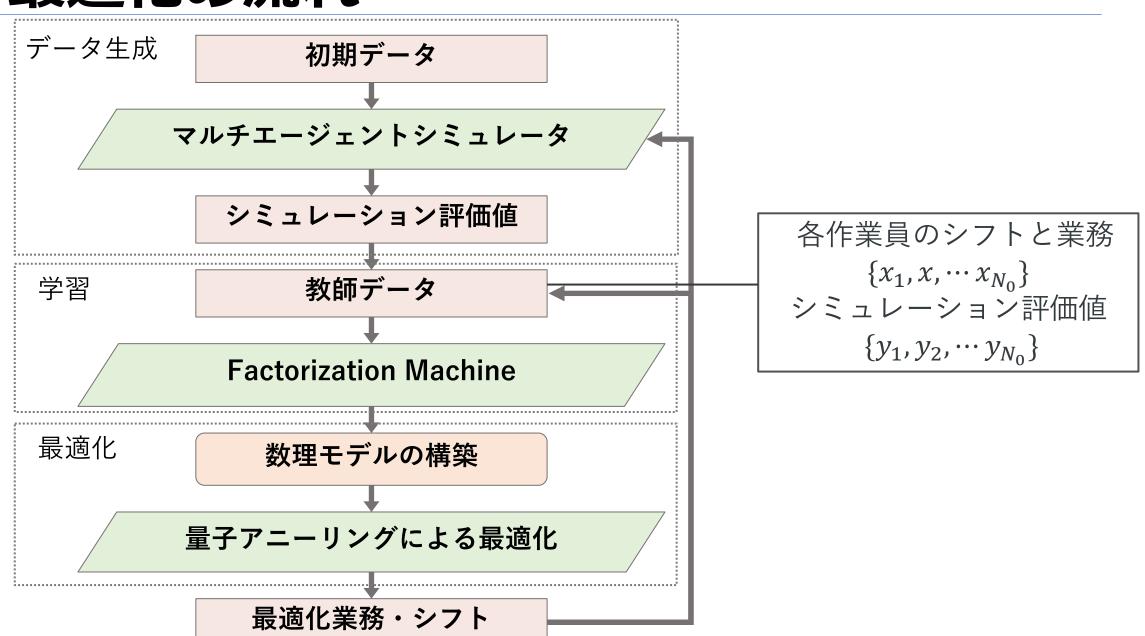
シミュレータによる最適化の検討

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



- 倉庫内シュミレータを構築し、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

 $H = \alpha H_s + \beta H_t + \gamma H_c$ (α~γは重み)

 H_s : リードタイム、荷物残留数 H_t : 合計労働時間

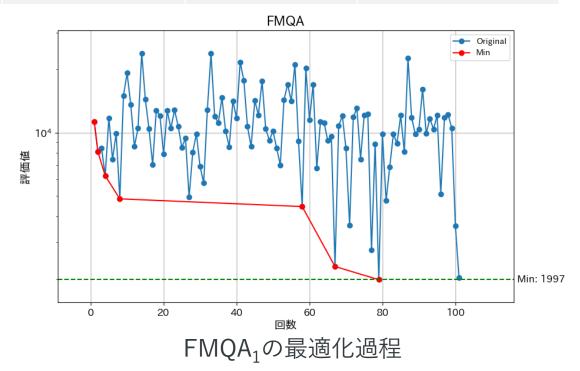
シフト・業務	α	β	γ	リードタイム	荷物残留数	合計労働時間
現実の倉庫のシフトと業務				1430	55	184
FMQA 1	1	10	1000	997	34	156
FMQA 2	1	5	1000	942	24	164
FMQA3	1	1	1000	895	2	184

FMQA 1

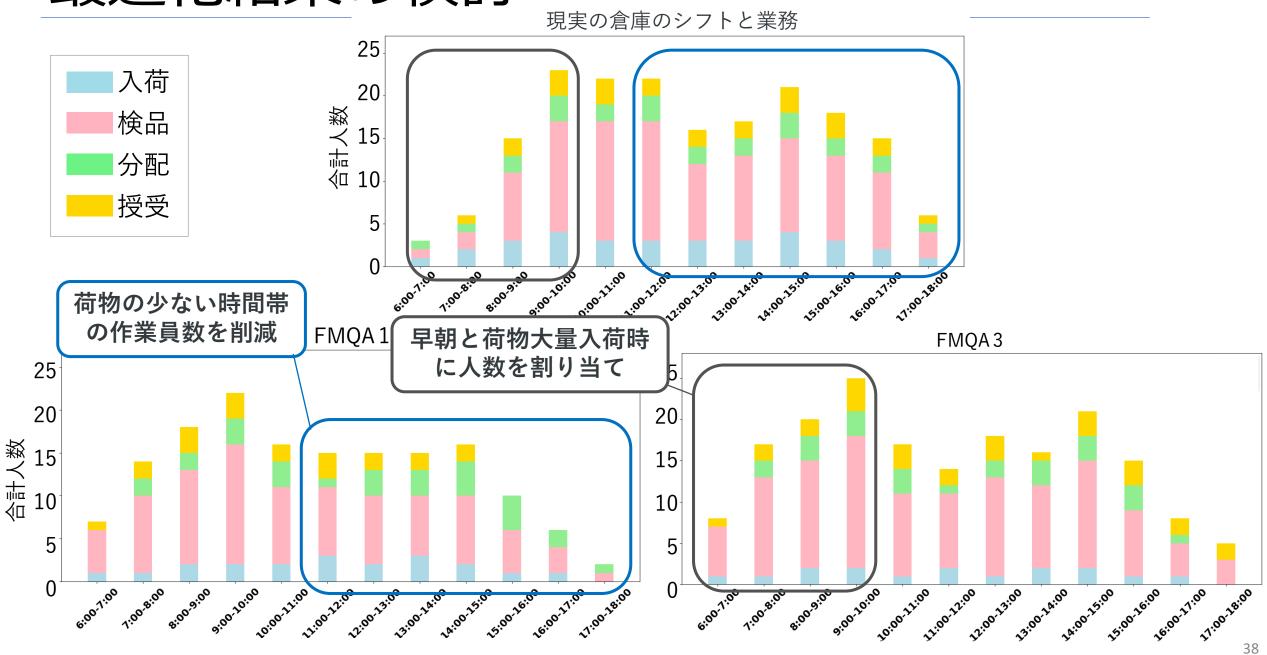
➤ 合計労働時間を10.8% リードタイムを30.23% 荷物残留数を35.50% 削減

FMQA3

▶ 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



VR空間からロボット遠隔操作(人手不足解消)



はじめてのユーザでも遠隔操作が可能

- 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) においてデモ発表
 - → 主に外国人研究者含め 80名以上が体験





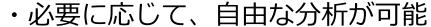
まとめ:次世代物流事業のあるべき姿

原状

- ・商品/配送のデータはあるが、 定期的・定型的な分析のみ
- ・システムが分断しており、データ連携が不十分
- ・データ活用の意識が低い (データ活用スキルも低い)
- ・改善の余地がある労働環境

近未来のあるべき姿





- ・システム間で、シームレスな データ連携
- ・AIを通じた多様な予測システム (様々な先回りを実現可能に)
- ・人の状況把握・行動支援で、より 「快適・楽しく・健康」な物流と 高い**労働生産性**を実現



産学連携により、より広い可能性