

# 第9回会津大学 ロボットシンポジウム

シミュレーションを活用した  
サイバーフィジカルシステムの研究・開発

2024年3月18日

株式会社FSK

## 概要

- サイバーフィジカルシステム(CPS)、デュアルスペース、ロボットデータリポジトリ(RDR)の概念に基づくシステムの研究開発と実証

## 研究開発・実証の方法

- 移動ロボットに外部カメラからの情報を追加し、移動ロボットだけでは難しい問題を解決
- 複数のロボットの連携は実空間では時間がかかるためシミュレーションで先行開発
- シミュレーションの研究開発結果を実機に反映して実証

## 最終目標

- シミュレーションを活用した移動ロボットと環境情報(外部カメラなど)の連携によるナビゲーション
- シミュレーションと実機を活用したロボット開発手法



# 1. 移動ロボットに関する研究開発

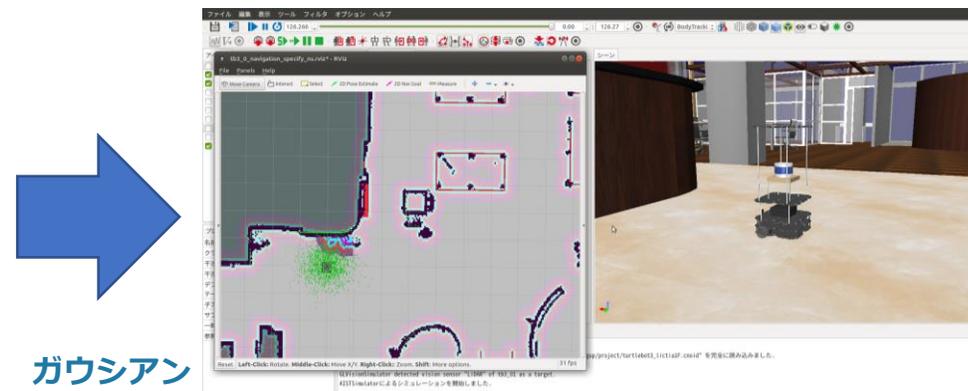
- ① シミュレーションと実機の**動作の違いを検証し、どの程度挙動に誤差が発生**するか確認
- ② 実空間の**動作ノイズ（誤差）と計測ノイズ（誤差）を仮想空間で再現**するとシミュレーションで動作が、**実機に近い挙動となる**ことを確認。シミュレーションで**外乱を想定した検証**が可能



実機

## JAD-TIS配送システム(ROS)

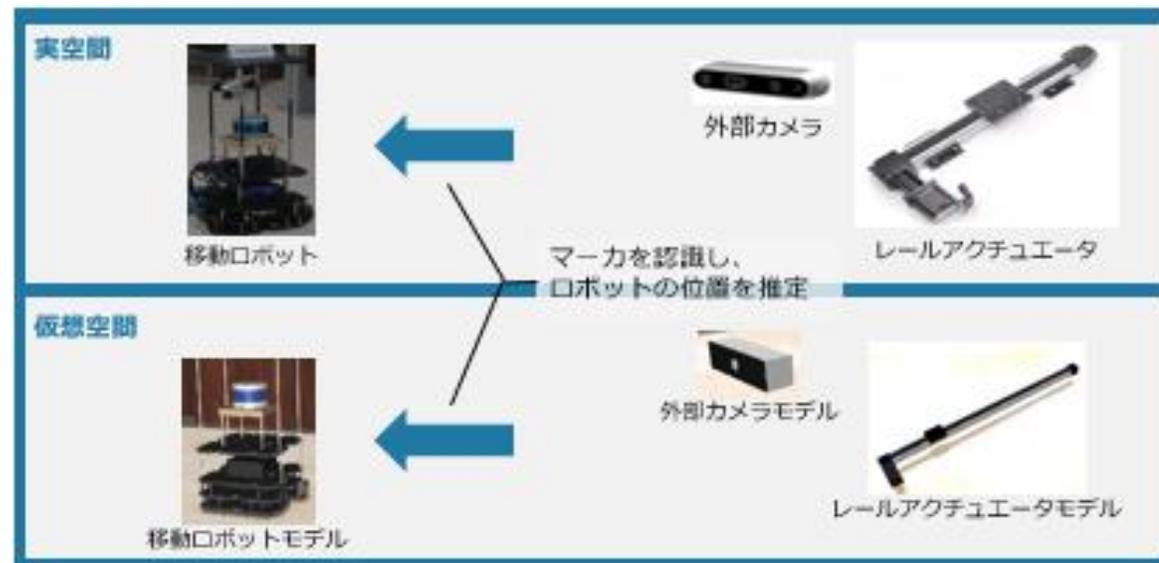
- ・ LiDAR SLAM
- ・ AMCL
- ・ 地図更新ノード
- ・ 経路コストマップ配信ノード
- ・ 移動指示ノード



ガウシアンノイズを付与

## 2. 環境情報の利用に関する研究開発

- ① 外部カメラを使用して移動ロボットの座標を取得し、**外部カメラからのロボット座標とシミュレーションで取得したロボット座標の差を確認**
- ② 外部カメラから取得した移動ロボットの座標と移動ロボット自身が取得する座標（自己位置推定）を比較し、移動ロボットの自己位置推定に大きなズレが生じたときキャリブレーションの再実行をするシステムを**シミュレーションで先行して開発**。



## 1. 移動ロボットに関する研究・開発

シミュレーション環境で**移動ロボットによる自動地図生成機能の実現と実空間特有の動作ノイズと計測ノイズを仮想空間で再現する手法の研究開発**

(1) シミュレーションによる地図生成の自動化

(2) シミュレーションのノイズモデルの研究開発成果を外部へ発表

## 2. 環境情報の利用に関する研究・開発

**複数サブシステムの連携を仮想空間で先行して開発し実機に反映**

(1) シミュレーションで先行開発した外部カメラから情報共有の仕組みを実機に反映

(2) 外部カメラから取得した障害物情報を地図に反映

# 移動ロボットに関する研究・開発

## (1) シミュレーションによる地図生成の自動化

### 【概要】

準静的物体(椅子、机など)が移動し**環境が変化したとき**、**SLAMを自動で実行**し変化後の環境地図を生成する。生成後、経路移動所要時間に関する実機環境及びシミュレーション環境での比較実験を行う

### 【目的】

実機で使用する環境地図をシミュレーションで生成し、準静的物体の配置が変更となった場合でも**常に最新の地図によるナビゲーション**を行えるようにする

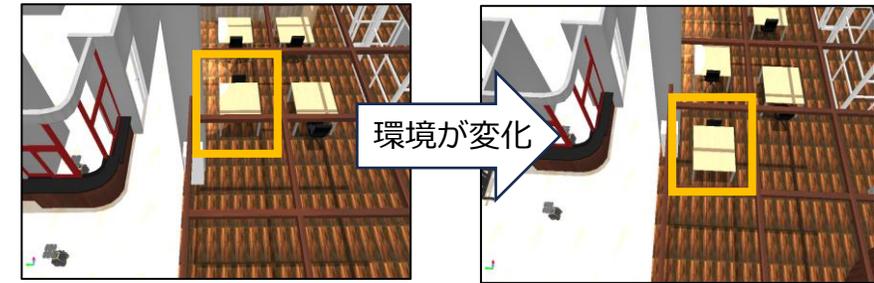


図1 準静的物体(机、椅子)が移動

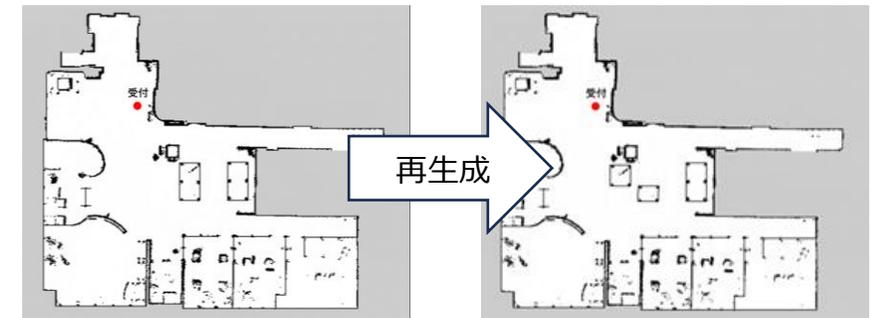


図2 SLAMを自動で実行して環境地図を再生成

- ・ シミュレーションで生成した地図を実機で使用

実機で使用する環境地図をシミュレーションで生成できれば、**実機で地図を再生成する手間を省くことができる**

## 【結果】

- ・ シミュレーションで生成した地図を使用し実機を動作させた場合、移動ロボットが**自律走行で目的地まで到達可能**
- ・ シミュレーションで生成した地図を利用し動作させた場合の移動所要時間の平均誤差は、実機で生成した地図を利用した場合と比較して±2.0秒程度  
※もたつき等で10秒程度の誤差が発生したデータは除外
- ・ シミュレーションで生成した地図を実機で使用することは十分に可能

## 【課題】

- ・ シミュレーションで生成した地図は実機で生成した地図と比較すると、もたつきやキャリブレーションの発生確率が10%程度上昇

表1 実機で生成した地図とシミュレーションで生成した地図を利用した場合の実機の平均所要時間

	地図生成環境	受付～事務室廊下		受付～個室		受付～会議室3		受付～会議室2	
		往路	復路	往路	復路	往路	復路	往路	復路
平均所要時間[s]	実機	66.793	53.560	69.670	64.080	77.403	76.355	101.270	95.195
	シミュレーション	66.112	55.425	69.780	64.812	77.460	75.620	101.650	95.970
所要時間の平均誤差[s]	-	-0.680	1.865	0.110	0.732	0.057	-0.735	0.380	0.775

実機で生成した地図とシミュレーションで生成した地図を利用した場合の実機ロボットの移動所要時間の平均誤差。

平均所要時間は、10回計測した際の平均値。

- : 実機より早い、+ : 実機より遅い。

## ・実機環境での経路移動時間の推定

複数ロボットを使用する場合、すれ違いが発生するため、正確な移動時間を計測する必要がある。グリッドマップ（占有格子地図）から推定した移動時間とシミュレーションでの移動時間、そして実機の移動時間を比較しシミュレーションによる事前検証が行えるか確認し、**実機での検証時間の削減**を目指す

### 【結果】

- ・実機とグリッドマップ（占有格子地図）から推定した移動時間を比較したとき、**-6.5～8.7秒の誤差**が発生し**ばらつきが大きい**
- ・実機とシミュレーションの移動時間を比較したとき、**多少のばらつきはあるが5.0秒程度の誤差**に収まる
- ・グリッドマップからの移動時間はばらつきが多いため、複数ロボットによる協働作業等での正確な時間推定は困難。シミュレーションで計測した移動時間は**ばらつきが比較的小さいためより正確な時間推定が可能**

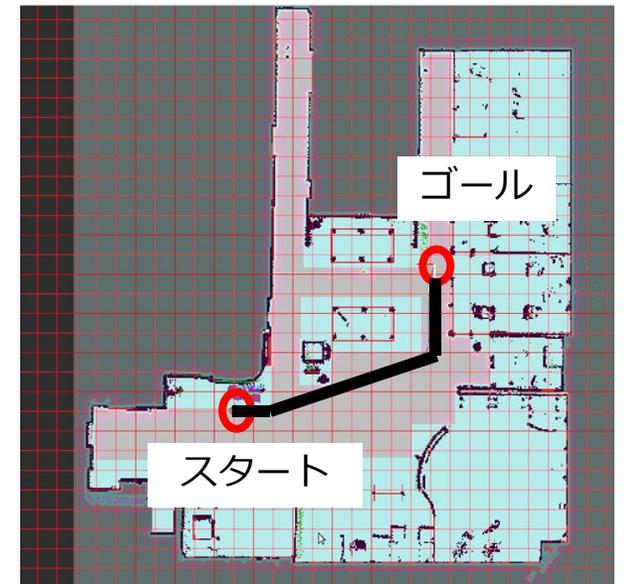


図3 LICTiAのグリッドマップ

## 【課題】

- ・ シミュレーションでは、その場旋回やカーブで数秒の遅延が発生
- ・ シミュレーションで所要時間の推定を行う場合、シミュレーション環境モデルの開発が必要

表2 実機（実機で生成した地図を利用）と各計測環境を比較した場合の平均誤差・増加率

		計測環境	受付～事務室廊下		受付～個室		受付～会議室3		受付～会議室2		備考
			往路	復路	往路	復路	往路	復路	往路	復路	
所要時間	平均誤差[s]	実機 + シミュレーション地図	-0.680	1.865	0.110	0.732	0.057	-0.735	0.380	0.775	シミュレーションで生成した地図を利用し、実機で10回試行した場合の平均所要時間と比較
	増加率[%]		-1.02%	3.48%	0.16%	1.14%	0.07%	-0.96%	0.38%	0.81%	
	平均誤差[s]	グリッドマップ	0.975	3.834	-1.373	-6.462	4.744	2.463	8.710	1.927	グリッドマップ（占有格子地図）から推定した所要時間と比較
	増加率[%]		1.46%	7.16%	-1.97%	-10.08%	6.13%	3.23%	8.60%	2.02%	
	平均誤差[s]	シミュレーション	5.093	2.230	3.155	0.160	2.467	4.139	4.885	4.055	実機で生成した地図を利用し、シミュレーションで10回試行した場合の平均所要時間と比較
	増加率[%]		7.62%	4.16%	4.53%	0.25%	3.19%	5.42%	4.82%	4.26%	
	平均誤差[s]	シミュレーション （最短時間）	2.907	1.240	2.380	-0.580	1.147	2.895	3.130	3.405	実機で生成した地図を利用し、シミュレーションで10回試行の中で最短の所要時間と比較
	増加率[%]		4.35%	2.32%	3.42%	-0.91%	1.48%	3.79%	3.09%	3.58%	

実機と各計測環境で10回計測した際の平均所要時間を比較した場合の所要時間の平均誤差・増加率。

- : 実機より早い、+ : 実機より遅い。

## (2) シミュレーションのノイズモデルの研究開発結果を外部へ発表

### 【概要】

2022年度行った「シミュレーションで人工的なノイズの付与を行ったナビゲーション結果と実機によるナビゲーション結果の比較」の検証結果を多くの方が利用できるように外部発表を行う

経路	センサノイズの有無	標準偏差 [m]	検出率	往路		復路		備考
				距離の平均誤差[m]	角度の平均誤差[°]	距離の平均誤差[m]	角度の平均誤差[°]	
受付⇄事務室	なし	0.01~0.03	0.7~1.0	0.067	-1.332	0.050	0.360	
	あり			0.067±0.01	-1.332±5.0	0.050±0.01	0.360±2.0	
受付⇄個室	なし			0.061	-1.109	0.045	-0.985	
	あり			0.061±0.02	-1.109±3.0	0.045±0.01	-0.985±2.0	
受付⇄会議室3	なし			0.088	-0.066	0.056	0.023	
	あり			0.088±0.02	-0.066±2.0	0.056±0.01	0.023±3.0	
受付⇄会議室2	なし	-	-	-	-	現実と仮想で移動経路が大きく異なり比較できず 検出率:1.0の場合は70%程度の確率で、 現実と仮想で移動経路が大きく異なる		
	あり	0.082±0.015	-0.404±2.0	0.052±0.01	-1.892±2.0			

図4 ナビゲーション結果一覧

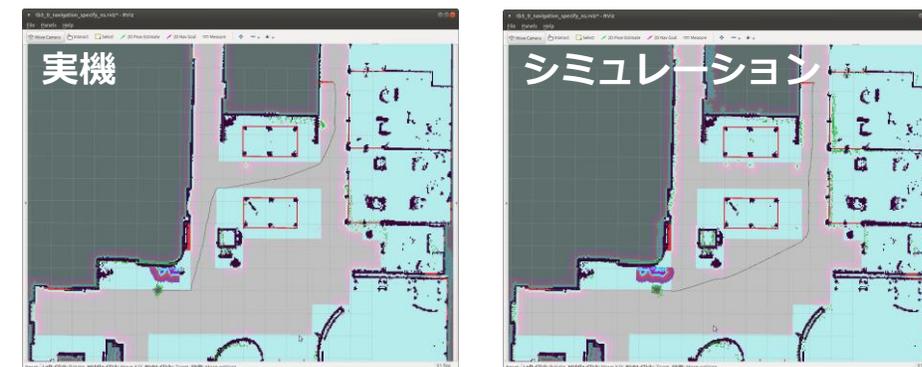


図5 実機とシミュレーションの経路の違い

### 【成果】

- 2023年12月14日にSI2023で発表

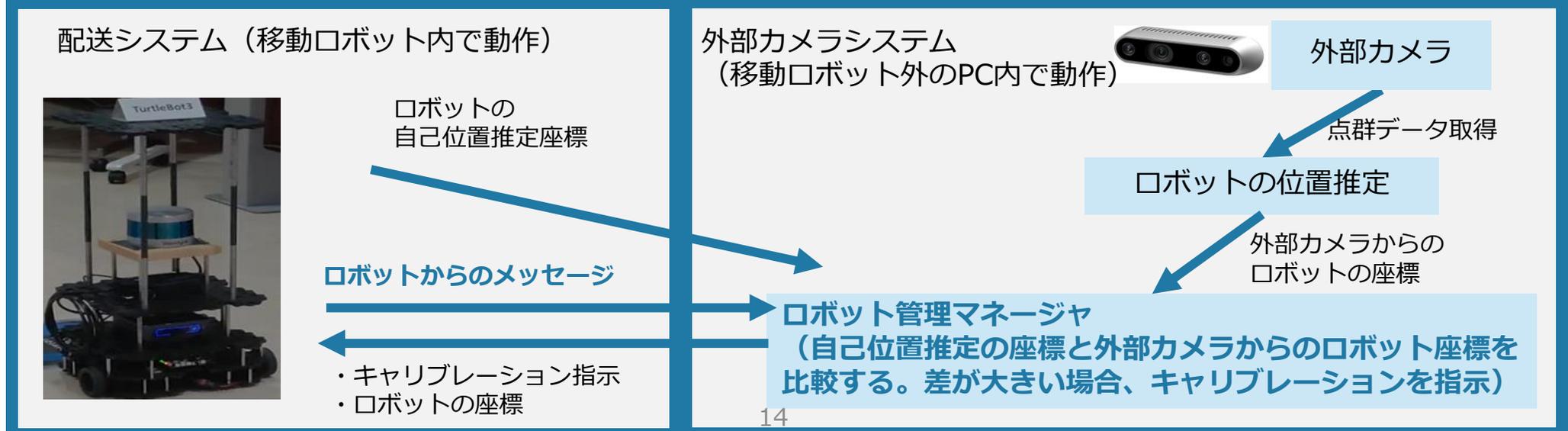
# 環境情報に関する研究・開発

## (1) シミュレーションで先行開発した外部カメラから情報共有の仕組みを実機に反映

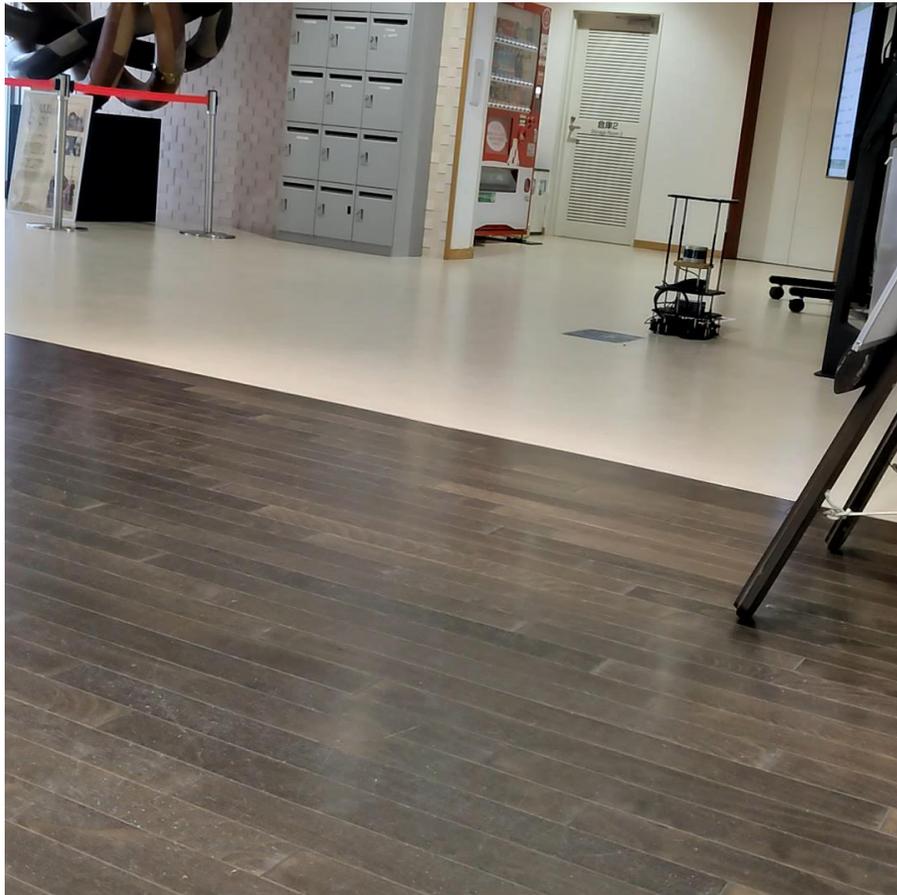
### 【概要】

2022年度にシミュレーションで先行開発した「シミュレーションを用いて外部カメラからのロボット位置とロボットの自己位置推定を比較し、キャリブレーションの再実行」を今年度は**実機を使用し検証**。移動ロボットが自身の位置を見失ったとき、再キャリブレーションをし**再度位置を取得できる**ようになる

### LICTiA内で実機を使用して検証



- 天井カメラからの情報でキャリブレーションの再実行
  - 経路移動中に外部カメラからの情報でキャリブレーションを実行



## 【動作結果】

- 外部カメラが取得したロボットの座標を使用し、再キャリブレーションを実行してロボットの座標を取得できることを確認。その後目的地に到着できることを確認
- シミュレーション時と同じく、外部カメラからのロボット座標と実際のロボット座標の誤差が大きい場合、再キャリブレーションに失敗

## 【課題】

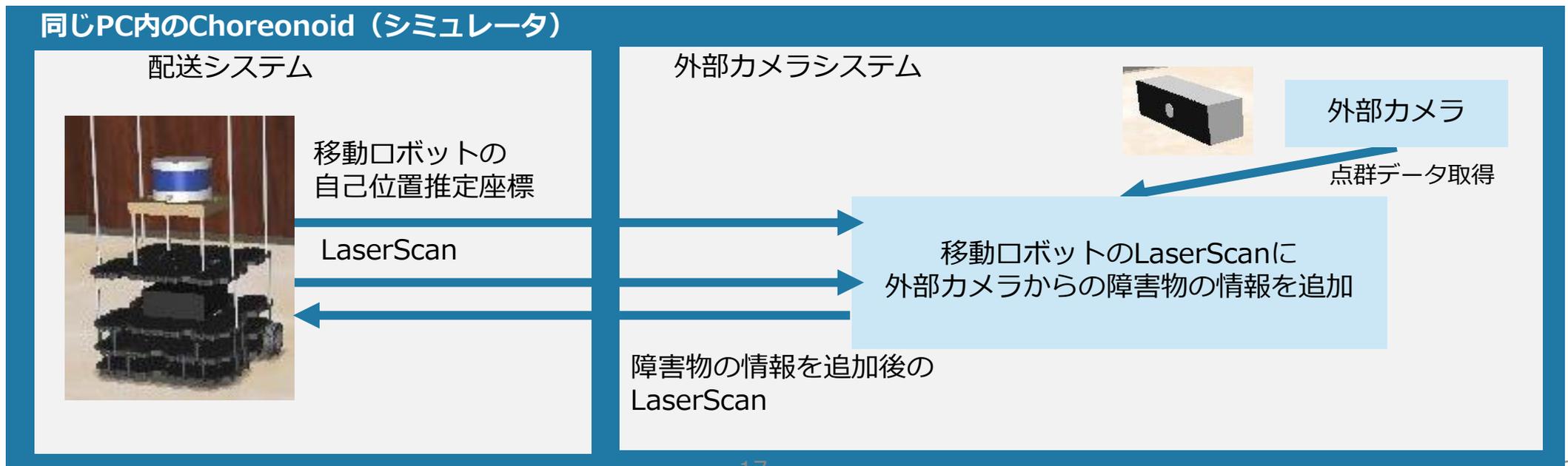
- 外部カメラからの情報の正確性が重要になる

## (2) 外部カメラから取得した障害物情報を地図に反映

### ① 移動ロボットから検知できない障害物の情報の共有

#### 【概要】

移動ロボットから検知できない障害物（足の高い机、範囲外の机）を天井の外部カメラから検知し、障害物を地図に反映する。これにより移動ロボットの認識外の障害物を回避できるようになる



## 【結果】

- 天井の外部カメラからの情報を利用し、移動ロボットが認識できない障害物を回避できることを確認



図6 移動経路上に足が高い机

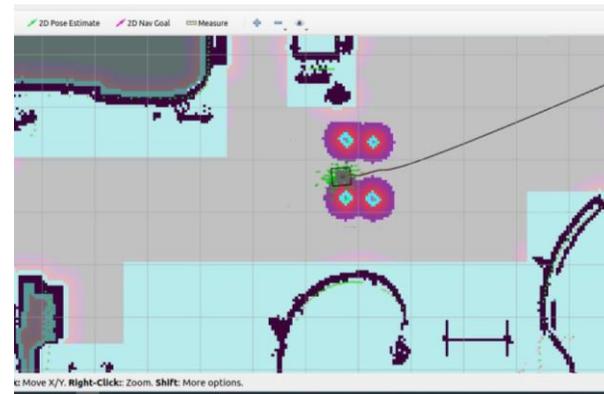


図7 外部カメラからの情報共有なし、  
移動経路上の机の下を移動

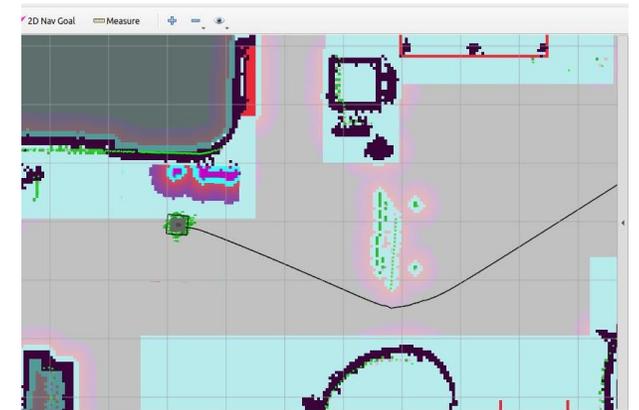
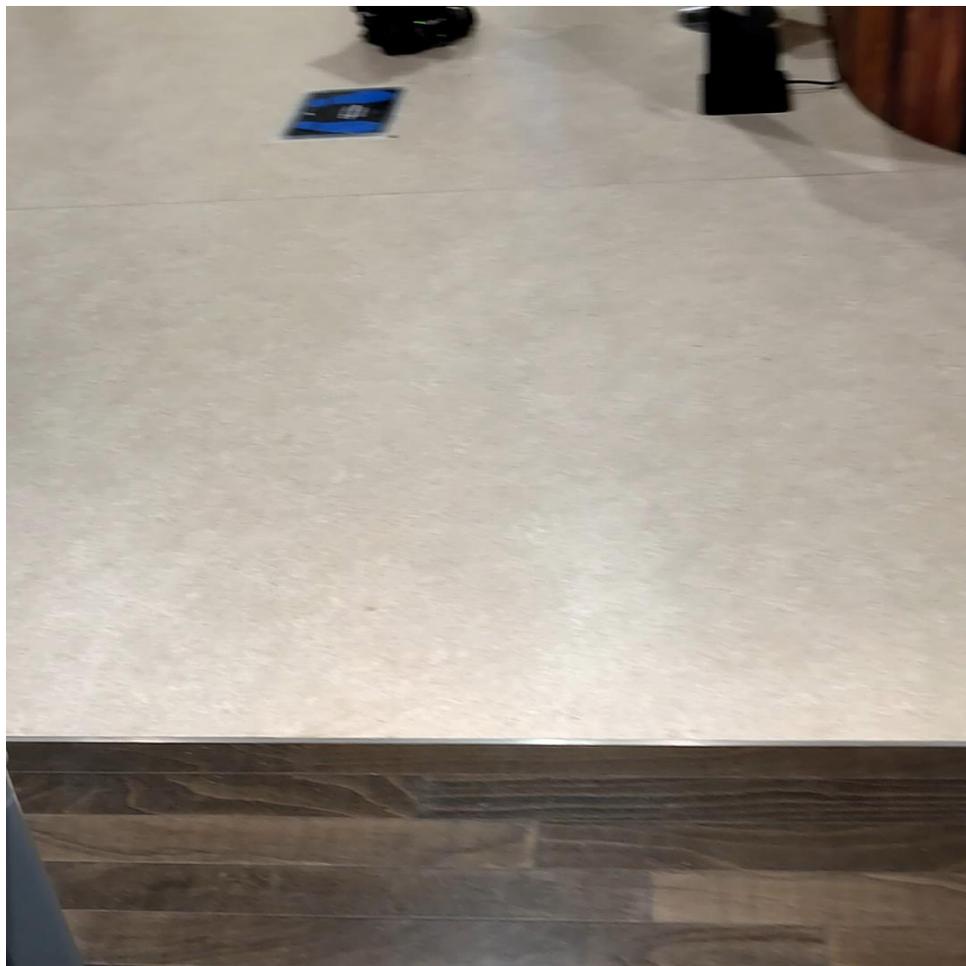


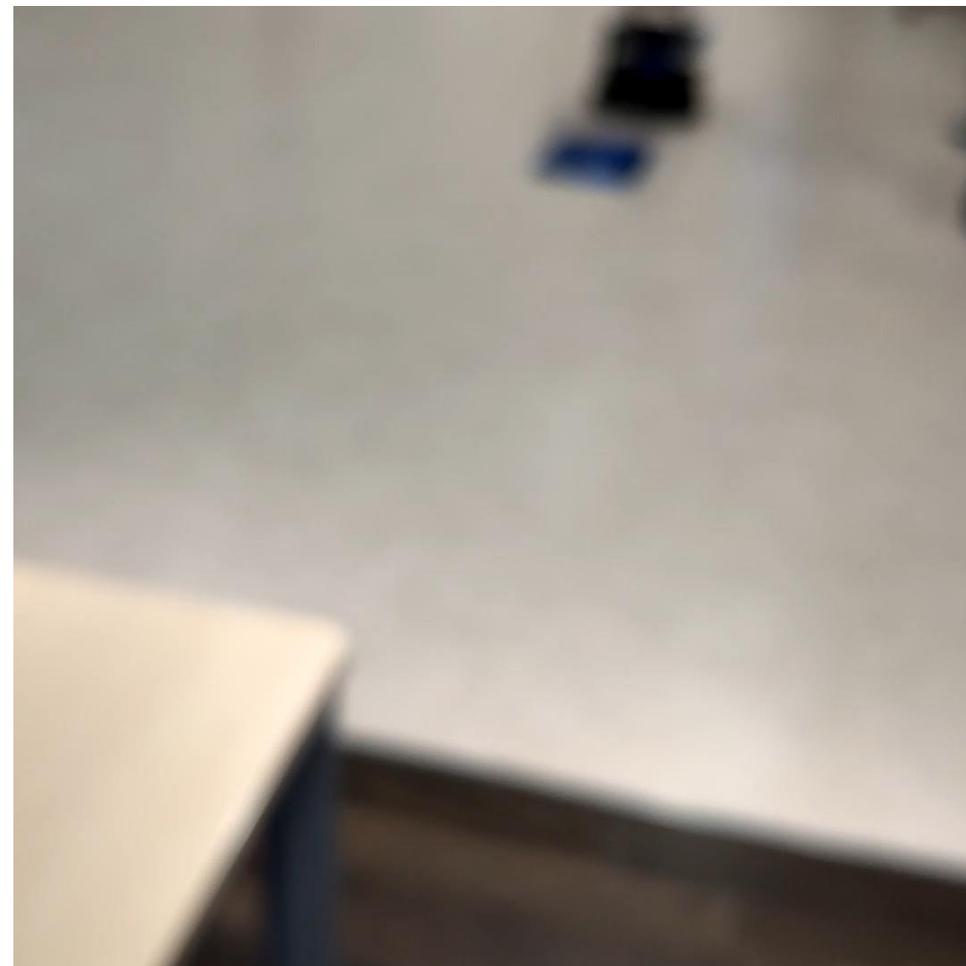
図8 外部カメラからの情報共有あり、  
移動経路上の机を避けて移動

## 【課題】

- 外部カメラがとらえた移動ロボットの一部を、障害物と認識することがあり、移動ルートに影響を与える場合がある



外部カメラからの情報共有なし、  
移動経路上の机の下を移動



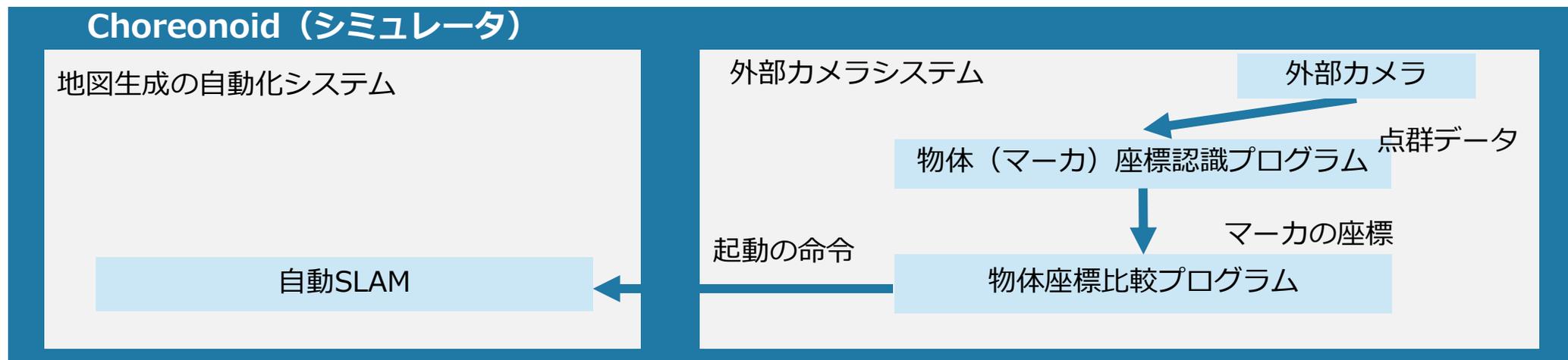
外部カメラからの情報共有あり、  
移動経路上の机を避けて移動

## (2) 外部カメラから取得した障害物情報を移動ロボットに反映

### ② 環境情報の変化（準静的物体の位置変化）を検知するシステム

#### 【概要】

準静的物体(椅子、机)が閾値以上移動したとき、**環境の変化を検知するシステム**をシミュレーションで作成。これにより、環境の変化を検知後、自動地図生成システムを起動し、最新の環境の地図を自動で作成することを目指す



#### 【成果】

- 環境の変化を検知するシステムを作成

# 今後の課題

1. 外部カメラから取得する値の精度  
外部カメラから移動ロボットに情報を共有するとき、外部カメラの値が**想定外の値を出力すると移動ロボットの挙動に大きく影響**を与える。そのため、外部カメラから取得する値の精度が重要
2. 研究成果が他のロボット・建物に適応可能か  
今回はLICTiA1階とタートルボット3のモデルを使用し検証を行っているが、**他のモデルにも適応可能か検証**が必要
3. シミュレーションモデル作成の簡略化  
シミュレーションを使用し開発や検証を行う際、**シミュレーションモデルの作成に時間がかかる**。そのため、**シミュレーションの使用はハードルが高い**。  
ハードルを下げるためには、シミュレーションモデル作成の簡略化が必要

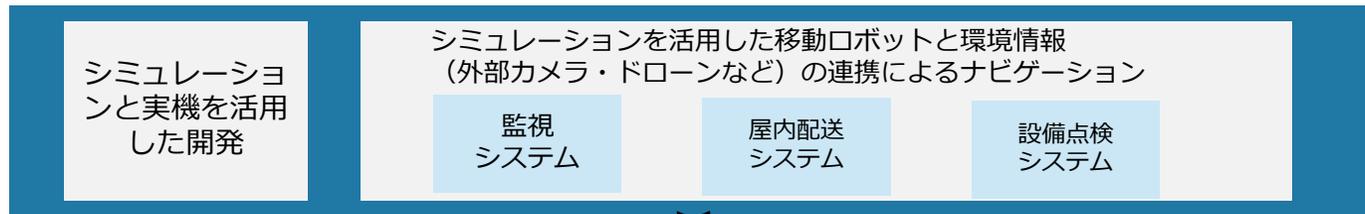
# 今後の展望

1. シミュレーションを活用した移動ロボットと外部カメラの連携によるナビゲーション
  - 屋内配送システム
  - 設備点検システム
  
2. シミュレータ技術の展開
  - ロボット・環境モデル作成
  - シミュレータ導入支援・提案
  - シミュレーションを使用したロボット開発支援
  - シミュレーションを使用した教育

**ロボットのみならず分野を問わない総合的な  
形態の業務を提案**

# イノベーションアーキテクチャ図

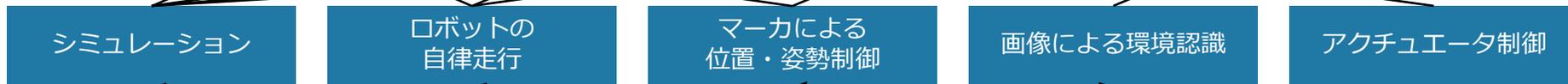
■市場 Market



■イノベーション領域 Innovation Area



■アプリケーション/手法 Application/Method



■技術要素 Technical Component



■研究要素 Research Component



■学術分野 Academic Area



ご清聴ありがとうございました  
**RTC-Library-FUKUSHIMA**  
**<https://rtc-fukushima.jp/>**

