

令和3年度 ロボット関連産業基盤強化事業費補助事業 実証実験レポート

外部環境に設置された複数のカメラでの ロボット位置推定によるロボットの安全管理とナビゲーション

2022.03.31

1.0版

TIS株式会社
会津大学

1. TISのご紹介
2. 研究内容
 - i. 研究開発の背景
 - ii. 研究開発の目的
 - iii. 昨年度の実施内容
 - iv. 今年度の実施概要
 - v. 今年度の実施内容
 - vi. システム概要
3. 実証実験
 - i. 実験概要
 - ii. 実施体制と役割
 - iii. 使用機器一覧
 - iv. 検証内容
 - v. 検証結果
 - vi. 考察
4. まとめ

1. TISのご紹介

■ 会社概要

(2020年4月1日現在)

社名 TIS株式会社 (TIS Inc.)

従業員 連結：19,483名 単体：5,506名
(2019年3月31日現在)

創業 1971年4月28日

売上高 連結：420,769百万円 単体：181,070百万円
(2019年3月期)

設立 2008年4月1日

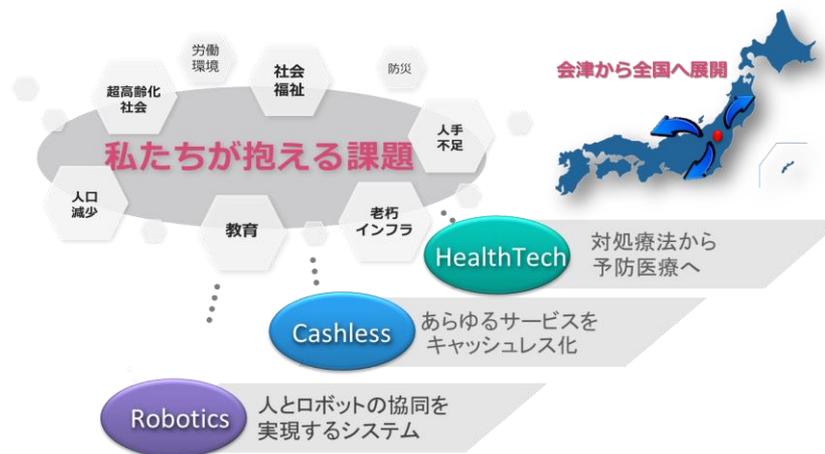
主要取引銀行 三菱UFJ銀行, 三菱UFJ信託銀行

資本金 100億円

上場市場 東証第一部 (3626)

■ 会津での取り組み

「キャッシュレス」、「ロボティクス」、「ヘルスケア」の各分野を中心に地域の皆様や地域企業と連携し、様々な社会課題・地域課題解決に向けたスマートシティ計画を推進、会津若松市で実証実験を実施します。



2. 研究内容

自律移動ロボットの需要拡大

少子超高齢による労働人口が減少した日本では、サービスロボットによる業務の省人化が必要とされる。特に物流業界ではその問題が顕著であり*1、昨今ではコロナウイルスの影響による巣ごもり消費の需要拡大によって、EC サイトでの購入頻度が増えたことも影響していると考えられる。またコロナウイルスによって非接触・非対面ニーズが増加し、無人配送ロボットや除菌ロボットといった自律移動ロボットの需要が増加している*2。

ロボット普及社会における安心・安全の必要性

自律移動ロボットが横断歩道を安全に渡るには、交通ルールを理解したうえで交通信号を認識し、緊急車両の有無等をロボットが理解する必要がある。また地域独自のルール(スクールゾーン、コミュニティゾーン等)も存在し、ロボットの走行エリアに応じてルールのプログラム化が必要となる。

これら技術要求を満たすために、高精度なセンサーや管理システムを備える必要がありロボットの高価格化を招いてしまい、満たしたとしても、ロボットベンダーやサービスプロバイダー側の機体設計不備、監視ミスや機体故障などのリスクがゼロではないため、市民生活に一定の不安は残る。**ロボット普及社会実現のためには、ロボットとその管理システムのみには依存するのではなく、社会全体でロボットの安心・安全を担保するシステムが必要である。**このような自律移動ロボットの安心・安全な高度運行を行うためのデジタルインフラの整備の必要性がデジタル田園都市国家構想でも言及されており、今後の施策によって取り組みが推進されると考えられる*3。

*1 国土交通省 物流政策課、“物流を取り巻く現状について”、2018年10月11日、<http://www.mlit.go.jp/common/001258392.pdf>

*2 一般社団法人 日本ロボット工業会、“コロナ禍におけるロボット活用事例”、2020年12月、https://robo-navi.com/servicerobot_covid/pdf/pdf_all.pdf

*3 デジタル庁、“デジタル社会の形成に関する重点計画・情報システム整備計画・官民データ活用推進基本計画について”、2021年12月24日、

https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/digital/20211224_policies_priority_package.pdf

IoTセンサーによるロボットナビゲーションと安全担保システムの検証

本研究ではIoTセンサーとして天井に設置されているカメラを使用してロボットの位置を推定し、その情報を基にロボットとその周囲の安全を担保するシステムを検証する。ただし2021年度ではロボットに搭載したARマーカを用いてロボットの位置を特定する。また外部カメラで特定した位置情報からロボットの経路計画を行うことで、ロボットの低廉化につなげる。

IoTは現在様々な用途で利用されており、今後も広がっていくと予想される。特にカメラはセキュリティ等の目的な様々なオフィスビル等に設置されており、最も汎用的なIoTセンサーであると考えられる。そのためスマートビルやスマートシティなどに設置された監視カメラの情報をロボットの監視に応用することで、最小限のコストでシステムを実装することができる。

よって本研究では、以下の観点から検証を行う。

- ロボット本体ではなく外部に設置されたカメラ情報を用いたロボットナビゲーションが可能であること
- ロボットが制御を失って暴走した場合でも、外部のカメラからロボットの異常を検知しロボットを停止させることで、周囲の安全を担保することが可能であること

これらの要因からロボットに二重化された高価なセンサーと高度な計算機能を搭載する必要がなくなり、新興メーカーの参入障壁が下がりロボットの製造コスト低減が期待できる。

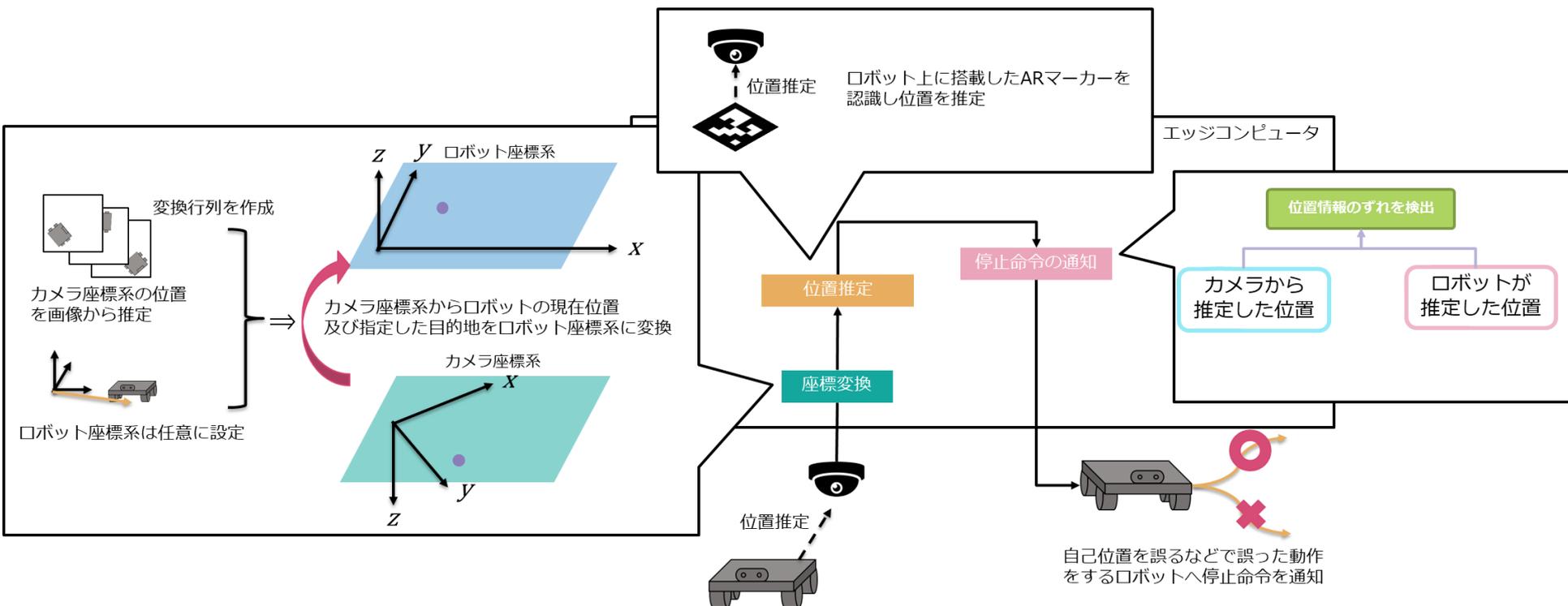
IoTセンサーによるロボットナビゲーションと安全担保システムの検証

本研究でのロボット監視技術が確立されることにより、自律移動ロボットのより高度な安心・安全を社会全体で担保する仕組みへとつながる。また相対的に自律移動ロボット個体への安心・安全への要求ハードルを下げることに伴い、安価なロボット機体での自律移動が可能になると考えられる。またコロナウイルスによって非接触・非対面が求められるようになり、自律移動ロボットの需要は今後も増加すると考えられるが、安心・安全を満たすロボットを開発できる企業はごく一部である。本研究によって多くのハードウェアメーカーに安心・安全が担保された自律移動ロボットの開発に携わることができるようになると考えられる。さらに将来的には自律移動が安価になること、多くのメーカーのロボット開発への参入が進むことによるロボット産業のすそ野の拡大によって、ロボットの普及拡大へとつながると考えられる。

会津大学との共同研究

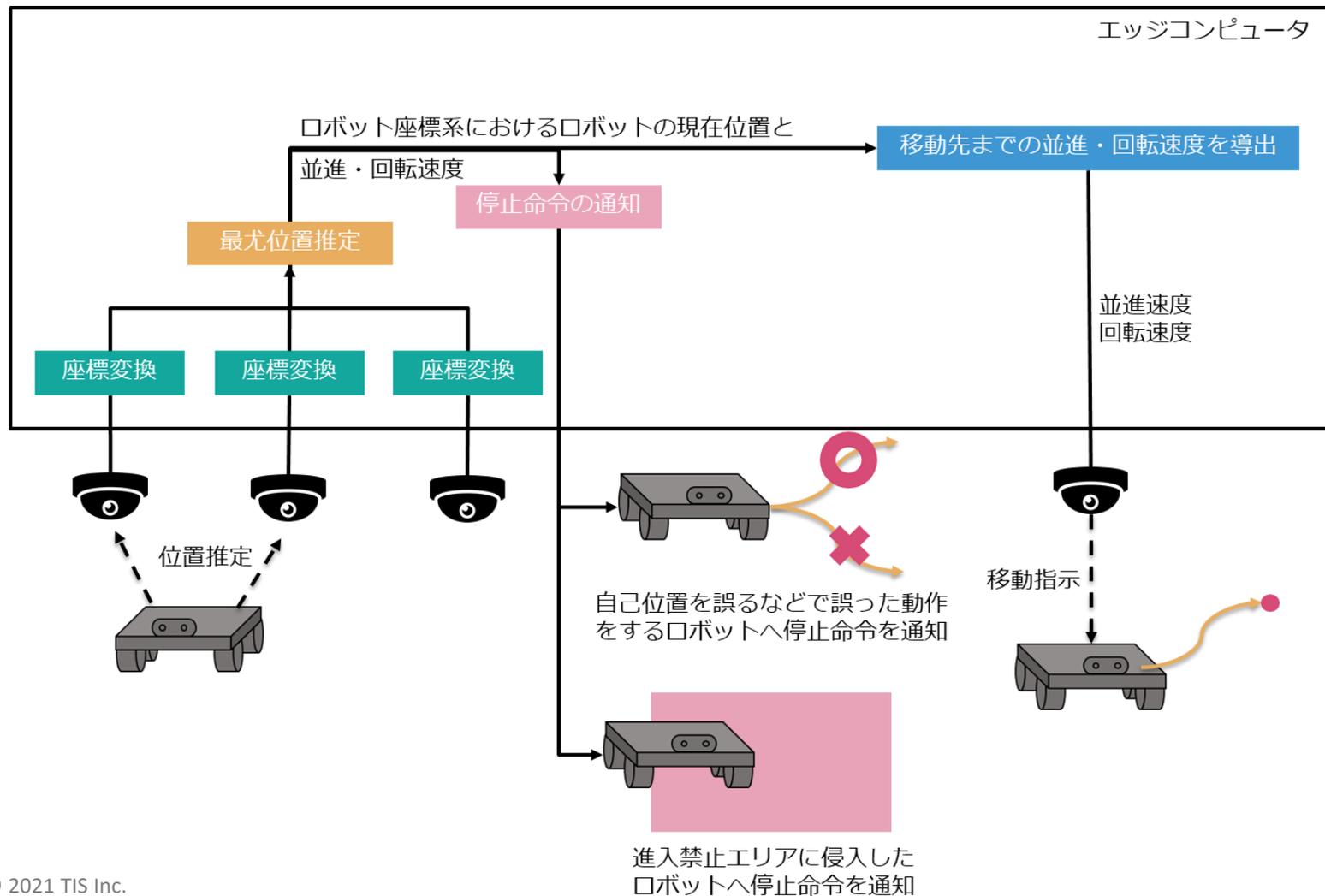
昨年度は会津大学の支援のもと、移動ロボット制御や環境情報とロボット制御の統合に関する共同研究を実施した。本年度も同様に会津大学の支援を受け、外部カメラ情報によるロボットナビゲーションや異常動作の検知機能を実装する。

昨年度の補助金事業では、単一カメラでロボット位置を推定し、その推定結果を基にした停止命令機能を実装した*4。



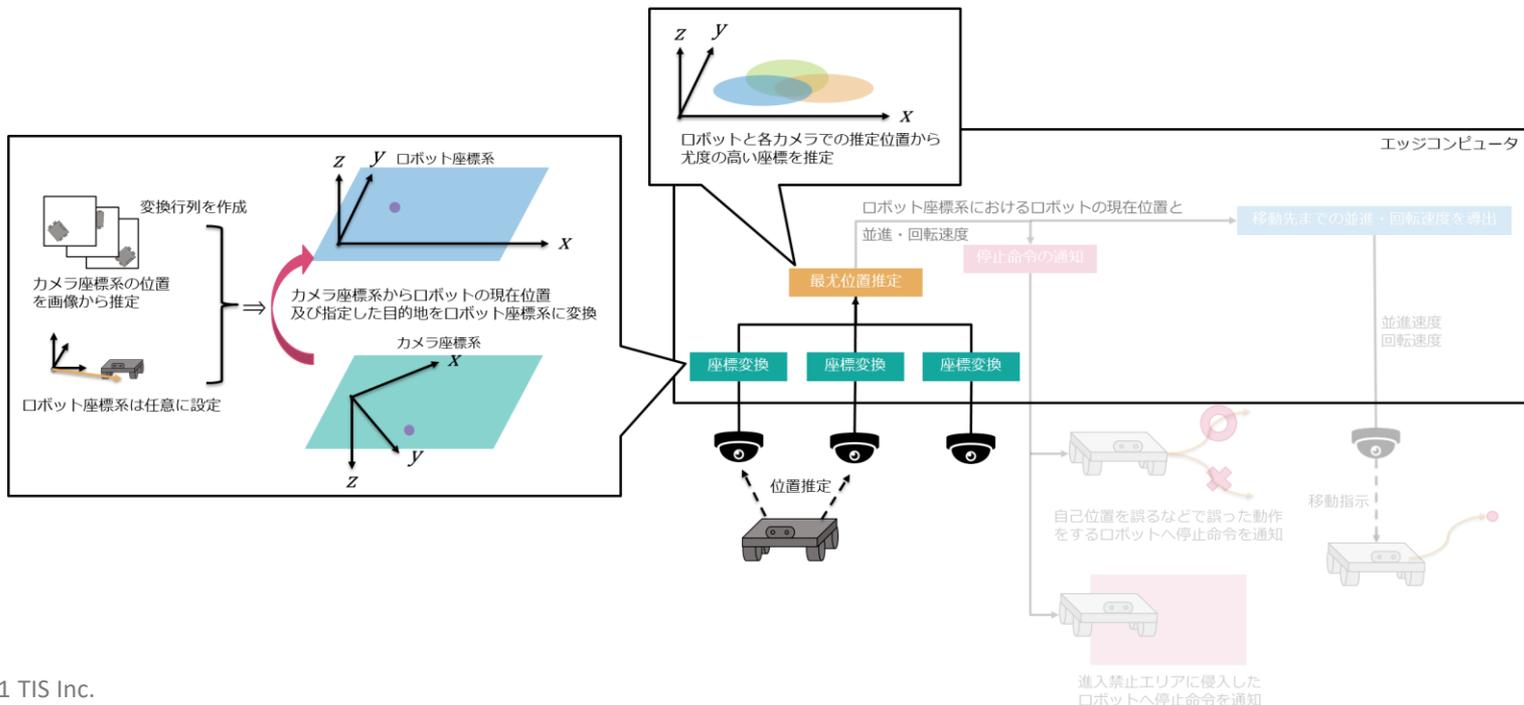
*3 TIS株式会社、「IoTセンサーを用いた自己位置推定誤り検出 実証実験レポート」、2021年03月19日、https://rtc-fukushima.jp/wp/wp-content/uploads/2021/03/IoT_Report_No3.pdf

本年度は昨年実施した「IoTセンサーを活用したサービスロボットによる自律移動の実現」を基に、安全性を担保する外部システムとロボット低廉化のための外部ナビゲーションシステムを実装する



1. 外部環境に設置された複数のカメラを用いたロボット位置推定

ロボットの運動モデルとカメラの観測モデルから、誤差を含んだ複数のカメラの観測値を基に、EKF(Extended Kalman Filter)を用いて最も確からしいロボットの姿勢(位置と向き)を推定する機能を実装する。昨年度はカメラ1台で視野が限定的であったが、本年度は複数台のカメラの視野を連結することで、位置推定に用いることができるカメラを次々とハンドオーバーし、より広範囲でのロボット位置推定を可能とする。また本年度もキャリブレーションの再検証を行う。昨年度はキャリブレーション精度が低く視野の外周部に歪みが生じてしまった。本年度は外周部でも精度を保つためのカメラキャリブレーション手法を検証し、一台当たりで可能な推定範囲の拡大を図る。



1. 外部環境に設置された複数のカメラを用いたロボット位置推定

以下に複数台カメラでの位置推定の手順を示す：

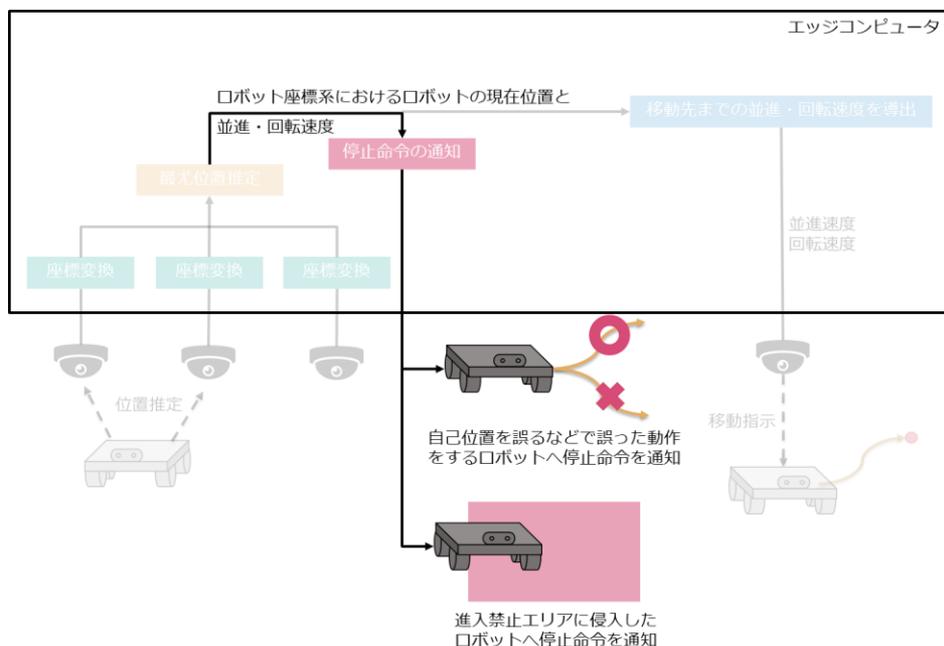
1. ロボットの位置と向きを一意に特定するロボット座標系を任意に定義
2. ロボット座標系と各カメラの座標系を変換する行列を作成
3. カメラにロボットが映り込んだ場合、各カメラのカメラ座標系を一意なロボット座標系に変換
4. 誤差を含んだロボットの姿勢とロボットの運動モデルから、最も確からしいロボットの姿勢を推定

2. 自律移動ロボットの危険検知

昨年度の自己位置認識誤りをより実用化した場合のユースケースを想定し、ロボットが自己位置を誤っただけでなく、車道走行時に赤信号の歩道を渡るなどの危険行為をするケースを作成し、その際にカメラからそれを検知し停止命令を送る。

本機能を活用することで、ロボットで認識できない障害物や、立ち入り禁止エリアへ侵入するロボットに対して停止命令を送ることで、安全及びプライバシーの保護を実現する。以下に手順を示す：

- ロボット座標系において、ロボットの立ち入りを禁止する領域を定義
- ロボットの自律移動中に禁止エリアへの立ち入りを検知し、ロボットに停止指示を送信



3. センサーレスロボットナビゲーション

昨年度の補助金事業では、外部のIoTセンサーを用いることによる安価なセンサーレスロボットでの自律移動を実現するために研究を3段階に分けて計画していた。

① IoTセンサーを用いた自己位置推定誤り検出の研究【昨年度実施済】

十分な役割を果たすロボットであっても、陥る可能性のある自己位置推定誤りを検出する機能を実装し検証する

② IoTセンサーと安価なセンサーを持つロボットによる自律移動の研究

安価なセンサーを用いたロボットの自律移動を、IoTセンサーを活用してアシストする機能を実装及び検証する

③ IoTセンサーによる自律移動の研究【本研究で実施】

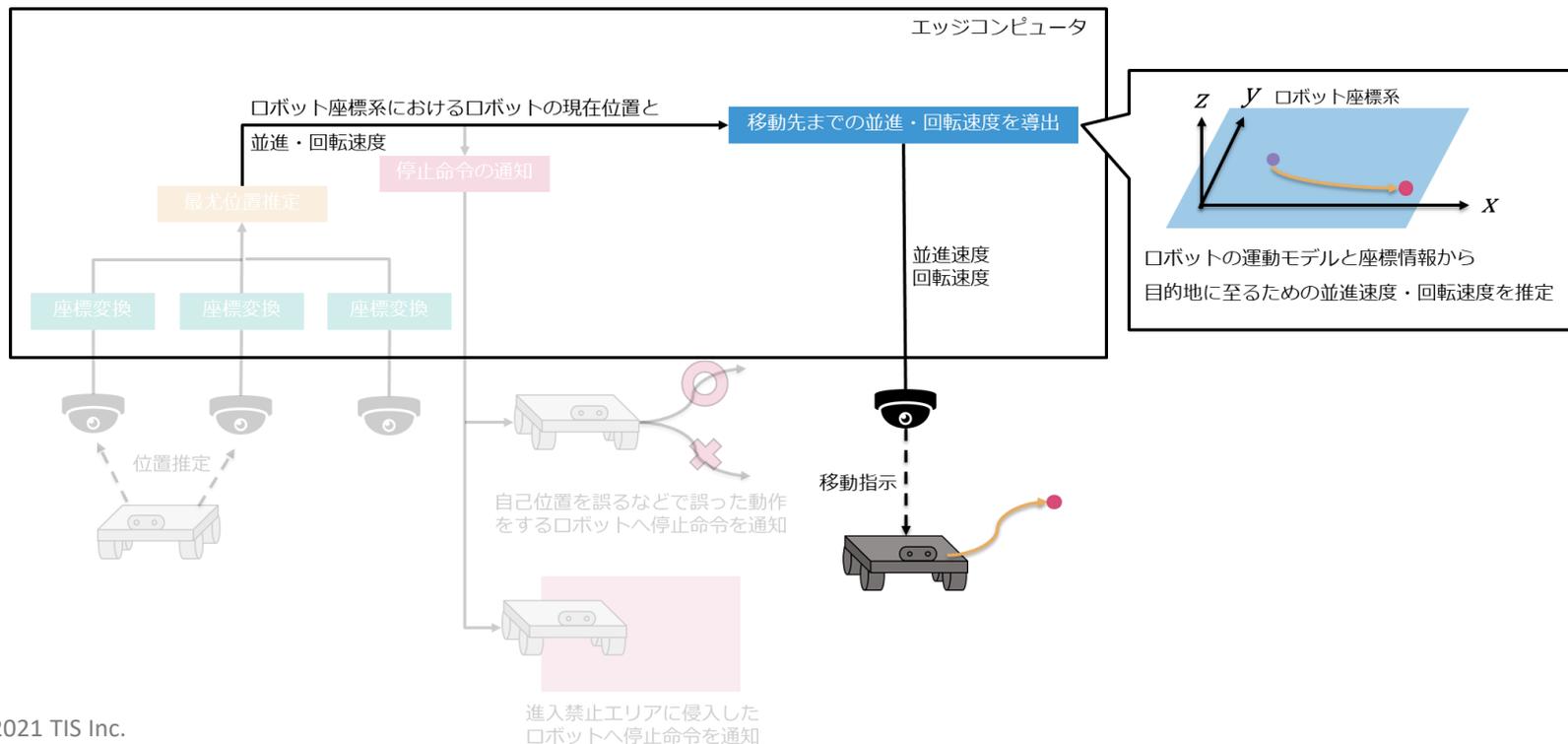
外界を認識するためのセンサーを持たないロボットを、IoTセンサーを用いて自律移動機能を実現し検証する

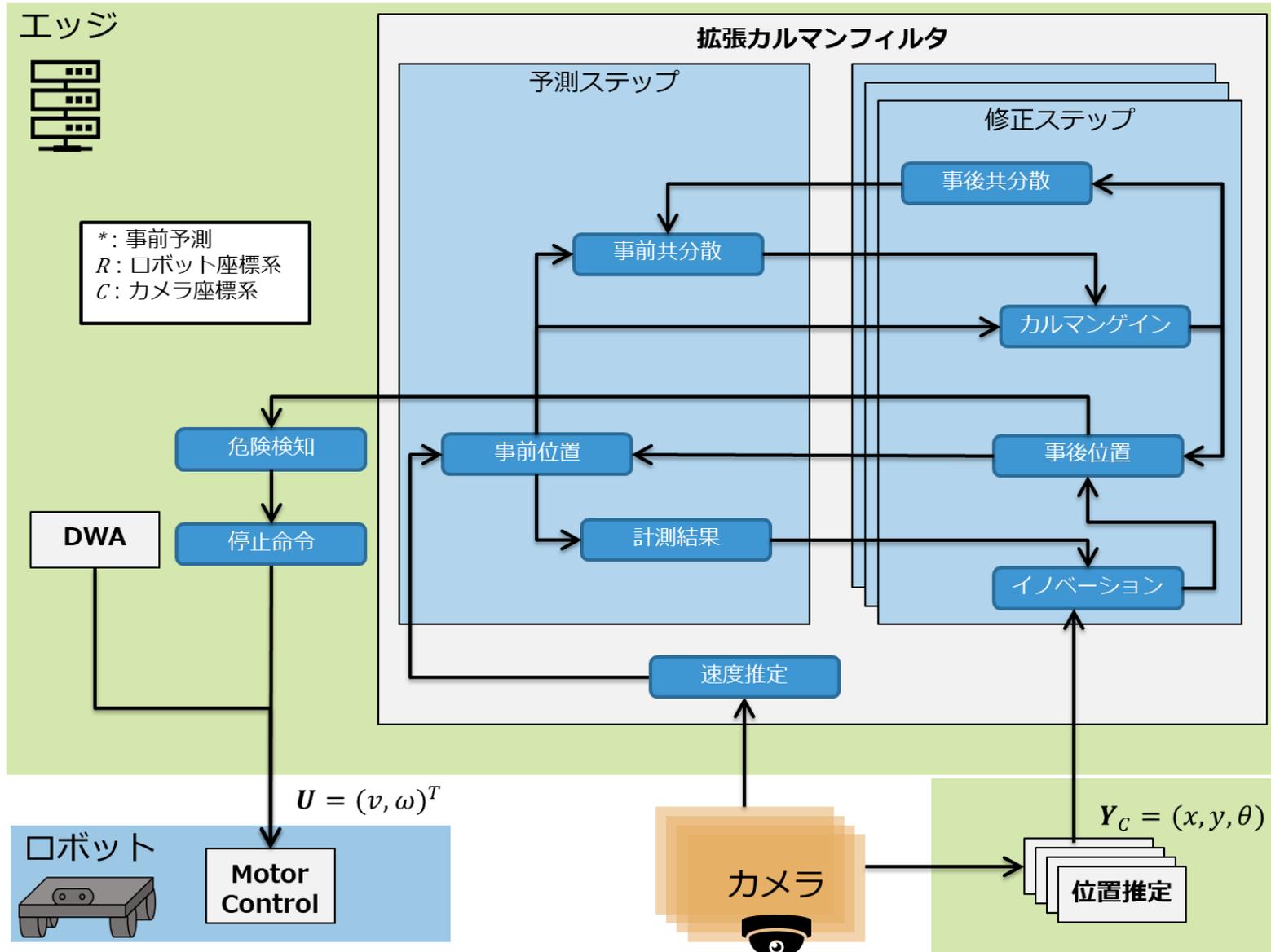
本機能は上記の③に該当し、ロボットのセンサー情報の代わりに外部環境のカメラの位置推定情報を使用してロボットの位置推定と目的地までのナビゲーションを実現する。

3. センサーレスロボットナビゲーション

以下にナビゲーション手順を示す：

1. 「外部カメラによるロボット位置推定」と変換行列からロボット座標における現在のロボットの位置と向き及び現在のロボットの並進速度や角速度を取得
2. 目的地に至るための並進速度・角速度をDWA（Dynamic Window Approach）等を用いて算出しロボットに指示

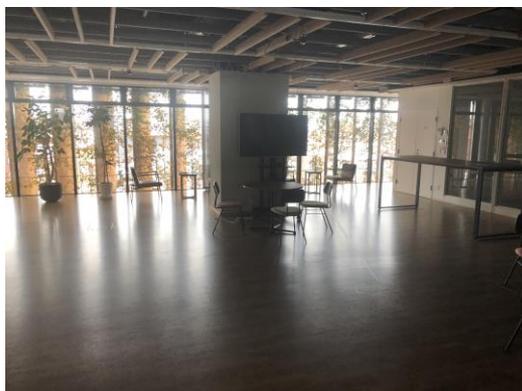




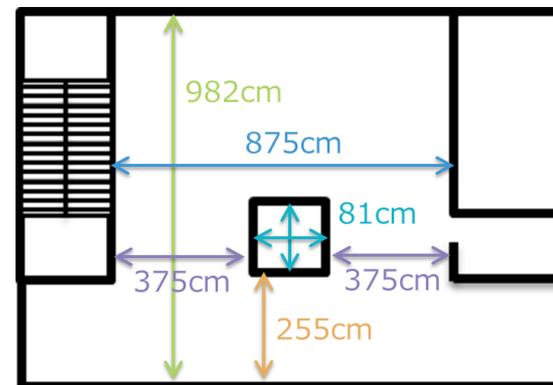
3. 実証実験

実証実験場所

■スマートシティAiCT 3階（共有スペース）



AiCT3階 共有スペースの外観



AiCT3階 共有スペースの寸法

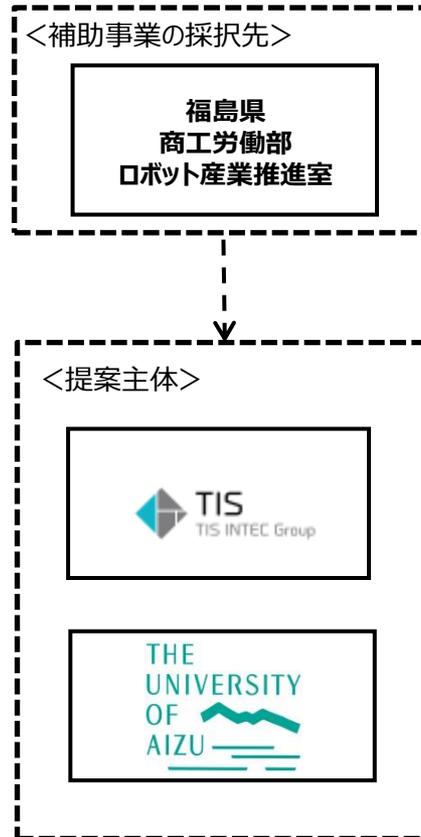
実証実験時期

- 1回目：2021/10/19（火）-10/22（金）
- 2回目：2021/12/21（火）-12/24（金）

実証実験概要

- 屋内走行する自律移動ロボットの自己位置推定誤り検出

＜実施体制＞



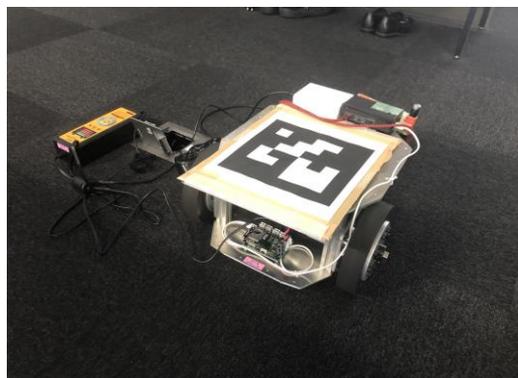
- ・プロジェクト推進
- ・実証実験企画
- ・ロボット制御・エッジ開発
- ・IoT制御部分開発

- ・技術的知見の提供

＜実施フィールド＞

スマートシティAiCT

機器カテゴリ	機器名称	台数
カメラ	コダック PIXPRO SP360 4K	3
カメラ制御用PC	Intel NUC 11 RNUC11PAHI70000	1
OS	Ubuntu 18.04	/
ミドルウェア	ROS melodic	/
画像処理ライブラリ	OpenCV 3.3.1	/
移動ロボット	Vstone メガローバー Ver2.1	1
ロボット制御用PC	Raspberry Pi 4 Model B	1
OS	Ubuntu 18.04	/
ミドルウェア	ROS melodic	/
ネットワークルーター	TP-Link ARCHER-AX73	1



移動ロボットの上にARマーカ―を設置
(マーカ―のサイズ : 184mm)



天井の梁に魚眼カメラを設置
ロボット上のARマーカ―を認識してロボット位置を推定する

① カメラとARマーカを用いた位置推定精度の検証

昨年度はカメラキャリブレーションと魚眼レンズによる歪み補正が不十分であり、画像周辺部の歪みが大きく、ロボット制御可能範囲に制限が生じた。本実証では補正方法を改良することで、より広範囲でのロボット制御を可能にする。

② 複数カメラによる位置推定精度の検証

複数台のカメラの位置情報を統合し、広範囲でのロボット制御を可能にする。

③ 危険検知機能の精度検証

EKFでロボットの禁止エリアへの侵入を検出し、安全・安心を担保するシステムとして十分な機能を果たすことを示す。

④ センサーレスナビゲーションの検証

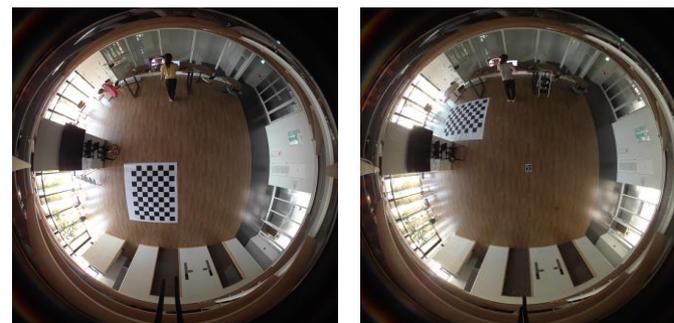
外部カメラ情報のみを使用したロボットナビゲーションを実装し、その移動精度を計測・分析を行う。

検証内容

昨年度はA4サイズ(210×297mm)のチェッカーボードを、カメラから10~20cm程度の距離に設置しキャリブレーションを実施したが、キャリブレーション後にも歪みが残る結果となった。本年度はより正確なキャリブレーションを実施するために、チェッカーボードとカメラの距離を、実際の検証時の距離(カメラが設置された天井と地面までの距離)と同等にした(約195cm)。また天井の高さに合わせてチェッカーボードのサイズを大きくした(2000mm×2400mm)。



昨年度のキャリブレーションの様子(左)と
検証時のマーカ認識の様子(右)



今年度のキャリブレーションの様子(左)と
検証時のマーカ認識の様子(右)

検証項目

- 前述したキャリブレーション手法による位置推定精度の向上を確認

検証手順

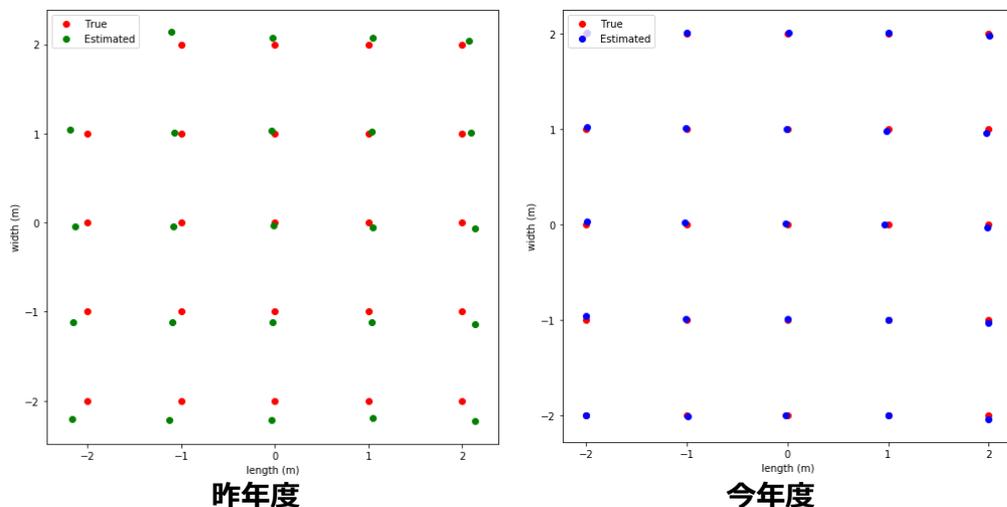
1. 床面にカメラの画像中心を原点とした4m四方の範囲内を実測し、1m間隔でポイントを設置
2. 各ポイントにARマーカを設置した画像(全25枚)を天井に設置したカメラから取得
3. 画像キャリブレーション及びマーカ検出を行い、昨年度の検証結果と比較

検証結果

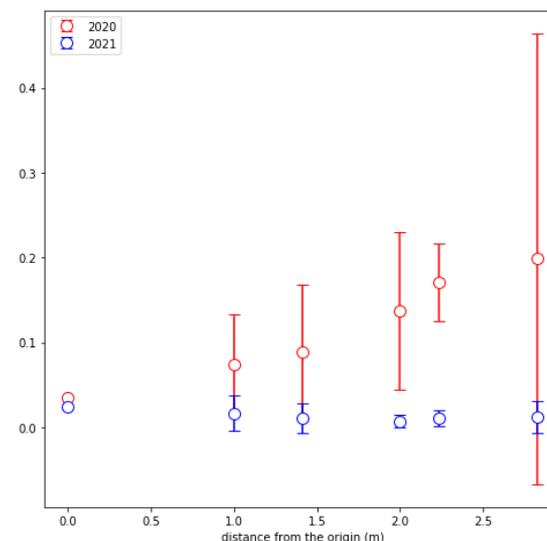
- 昨年度と比較して真値との誤差が減少
 - 昨年度は原点から離れるにつれ誤差が増加していた
 - 本年度の検証では誤差の増加が見られなかった

考察

昨年度と比較して、前述したカメラキャリブレーション手法による位置推定精度の向上が確認された。具体的に昨年度は誤差が20cm以上生じていたのに対し、本年度は3cm程度にまで抑えられている。



カメラでの推定位置と実測値の比較



実測値とカメラでの推定位置の誤差平均と信頼区間
(○：平均値、エラーバー：95%信頼区間)

①カメラとARマーカ―を用いた位置推定精度の検証

2020年度の計測結果

原点からの距離	0.000	1.000	1.414	2.000	2.236	2.828	
サンプル数	1	4	4	4	8	3	
平均(m)	0.036	0.074	0.089	0.138	0.171	0.199	
分散		1.4×10^{-3}	2.5×10^{-3}	3.4×10^{-3}	3.0×10^{-3}	1.2×10^{-2}	
信頼区間 (95%)	上限		0.014	0.009	0.045	0.125	-0.067
	下限		0.133	0.168	0.231	0.216	0.465

2021年度の計測結果

原点からの距離	0.000	1.000	1.414	2.000	2.236	2.828	
サンプル数	1	4	4	4	8	4	
平均(m)	0.024	0.017	0.011	0.007	0.010	0.012	
分散		1.7×10^{-4}	1.3×10^{-4}	2.0×10^{-5}	1.3×10^{-4}	1.4×10^{-4}	
信頼区間 (95%)	上限		-0.004	-0.007	0.001	0.001	-0.007
	下限		0.037	0.028	0.014	0.020	0.030

検証内容

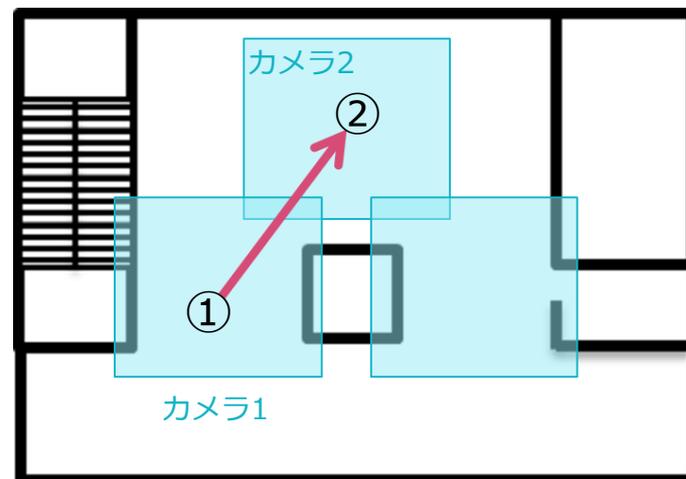
昨年度は1台のカメラの観測情報をそのままロボットの姿勢として推定していた。このシステムはシンプルで、ロボットの作業空間が1台のカメラで全てカバーできる場合には十分に動作する。しかし実際のビルなどロボットの作業空間をカバーするためには複数のカメラの視界を連携する必要がある。この場合、あるカメラの視界から別のカメラの視界へと切り替えた瞬間にロボットがジャンプしたかのように推定してしまう可能性がある。これはカメラのキャリブレーションをどれほど緻密に実施しようとも、カメラのマウントが経年によりほんの少しズレたことで推定するロボットの位置に大きな影響がでるため、避けることができない。よって今年は、複数台のカメラの位置情報を、それぞれある程度の誤差が含まれていることを織り込んで制御工学的な手法で統合し、最も確からしい位置を推定することで、複数カメラを連結したより広範囲な作業空間でのロボットの位置推定を可能とする。

検証項目

1. 2台のカメラを視野が一部重複するように配置し、移動ロボットに各カメラの視野をまたぐように移動させた場合(下図)、カメラ視野の切り替えがロボット位置推定への影響がないことを確認する。
2. 一部カメラ情報に誤差が含まれていても、他のカメラ情報を用いてその誤差の影響を抑えることができることを確認する。

検証手順

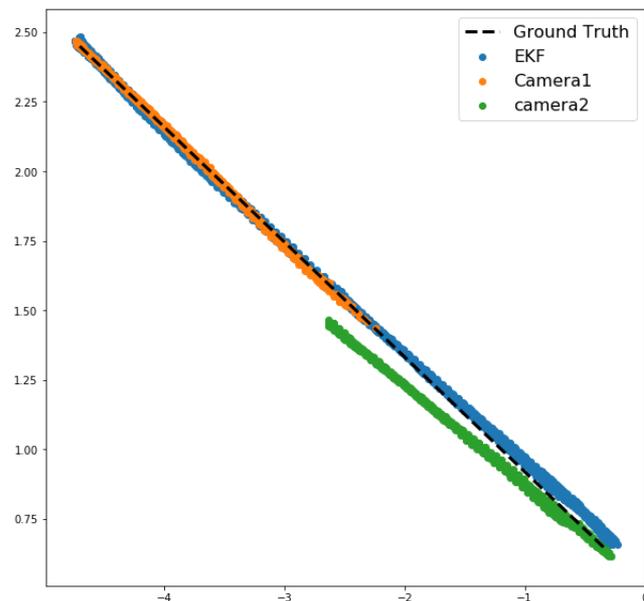
1. スタート地点①からゴール地点②（右図）を設定し、その間の直性経路を真値とする
2. カメラ2が誤差を生じるように、カメラ位置を人為的にずらす
3. ①から②までの経路を遠隔操作で走らせ、カメラ単体での位置推定結果と拡張カルマンフィルタによる統合位置情報を記録
4. 統合位置情報をカメラの視野範囲別に分類し解析
 - I. カメラ1の視野範囲
 - II. カメラ1 & 2の視野範囲
 - III. カメラ2の視野範囲



検証結果 1

下図に各カメラで取得した位置情報と、その情報を基に拡張カルマンフィルタで推定した統合位置情報を示す。

- カメラ2の位置情報に誤差が生じたため、カメラ2の位置情報は真値と大きくずれた結果になった
- 対して拡張カルマンフィルタではカメラ2の結果を用いているにもかかわらず、真値に近い推定結果となった

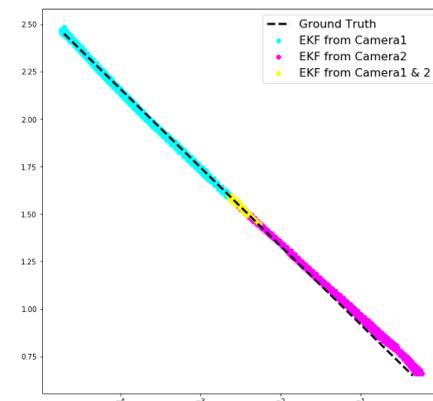


カメラで取得した位置情報と
拡張カルマンフィルタで推定した統合位置情報の比較

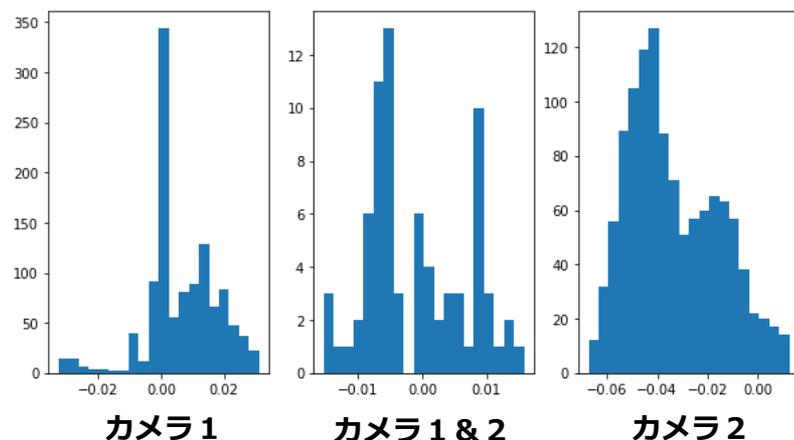
検証結果 2

統合位置情報と真値との誤差をカメラの視野範囲別に分類し解析した結果を以下に示す

- 真値との誤差は、カメラ2のみの場合が平均・分散どちらも大きく、真値とのずれが大きいことが分かる
- カメラ1および2の範囲内ではカメラ2単体と比べて誤差が小さく、カメラ1の正確な情報が誤差を抑えていることが分かる



カメラ範囲別統合位置情報



移動情報と真値の誤差(カメラ範囲別)

	カメラ1	カメラ1&2	カメラ2
サンプル数	1145	76	1163
平均	0.006	-0.001	-0.033
分散	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
最大値	0.031	0.016	0.013
最小値	-0.033	-0.015	-0.067
中央値	0.005	0.005	0.00

移動情報と真値の解析結果(カメラ範囲別)

考察

1台では把握できない範囲を、複数台カメラの連携による把握が可能であることが分かった。またカメラ情報に誤差が含まれていても他のカメラの情報と統合されることで誤差の影響を最小限に抑えることができた。

検証内容

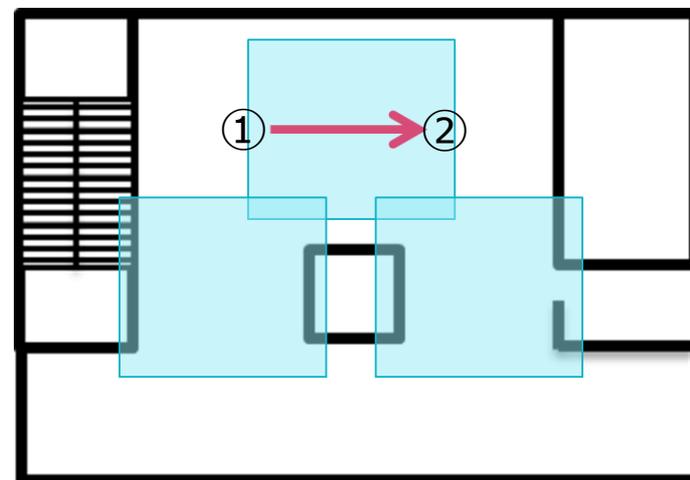
前述の検証から外部の複数カメラを統合し最も確からしい姿勢を推定できることが確認できた。この推定情報を基にロボットが誤って禁止エリアへ侵入したことを外部のカメラ映像のみからある程度リアルタイムに検出できることを検証する。これにより、ロボットが安全であることをロボット以外のシステムから確認できるようになり、本研究が安全・安心を担保するシステムとして機能を果たすことを示す

検証項目

1. 禁止エリアへの侵入を検出し停止することを確認する
2. ロボット速度及びカメラ側のプログラム実行周期を変更した場合の、停止までの距離を計測、ロボットの速度と停止距離の関係を考察する

検証手順

1. スタート地点①からゴール地点②（右図）間の経路をロボットに等速移動させる
2. 禁止エリアへの侵入を検知するとロボット停止命令を送信する
3. ロボットが停止した位置を記録しデータ解析を行う

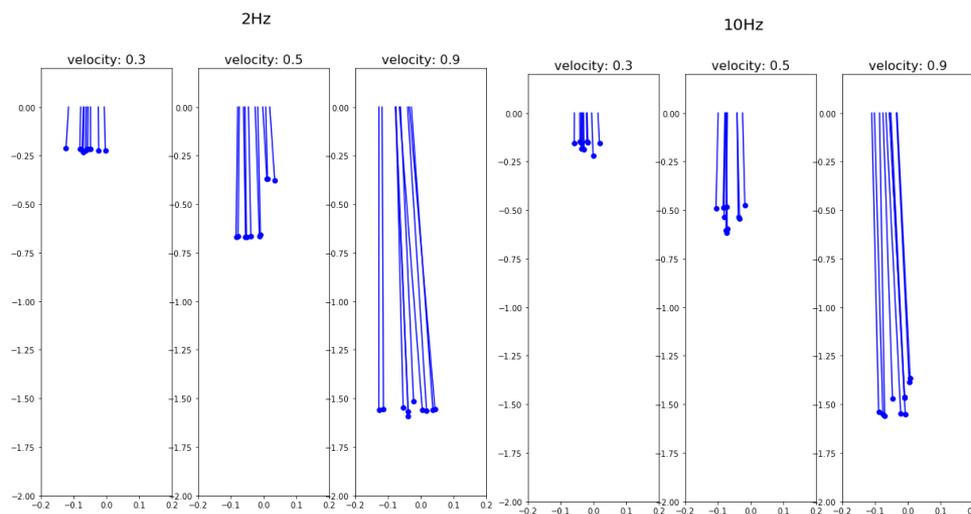


実証環境のカメラの視野範囲とロボットの移動経路
青い四角はカメラの視野範囲、矢印は移動経路を表す

検証結果

禁止エリアへの侵入から停止するまでの距離を速度別・プログラムの実行周期別に解析した結果を以下に示す

- ロボットの速度上昇に伴い禁止エリア侵入から実際の停止位置までの距離が増加
- プログラムの計算サイクルが低い場合、平均・分散が増加



禁止エリア侵入から停止位置までの移動距離(禁止エリア:y < 0)

2Hz	0.3m/s	0.6m/s	0.9m/s	10Hz	0.3m/s	0.6m/s	0.9m/s
サンプル数	10	10	10	サンプル数	10	10	10
平均	0.221	0.578	1.558	平均	0.169	0.536	1.491
分散	3.6×10^{-5}	0.02	36.9×10^{-5}	分散	0.001	0.003	0.005

考察

ロボットの安心・安全のために、禁止エリアに対してロボットが侵入したことを外部から検出し停止させるシステムを実装し、ロボットが禁止エリアに侵入してから停止するまでの距離を計測した。その結果ロボットの速度が向上するに従い、停止位置も比例して増加することが確認された。またプログラムの実行サイクルが低くなると、カメラが観測してから実際に停止判定を行い、停止命令を発行するまでの待ち時間が発生する場合がある。そのため停止命令が発行されるまでの処理時間にばらつきが発生し、平均と分散が増加したと考えられる。またカメラ制御側の計算サイクルが下がるにつれ停止位置も比例して増加した。実際の運用においては、ロボットの移動速度やエッジ側のプログラム処理性能等を考慮する必要があると考えられる。

実世界においては、例えばスクールゾーン等といった地域独自のルールによってロボットの立ち入りを禁止することが考えられる。これらを各ロボットベンダーが独自に実装するだけでなく、社会システムとして実装することで、安心・安全なロボットとの共生社会を実現する一助になることが期待できる。

検証内容

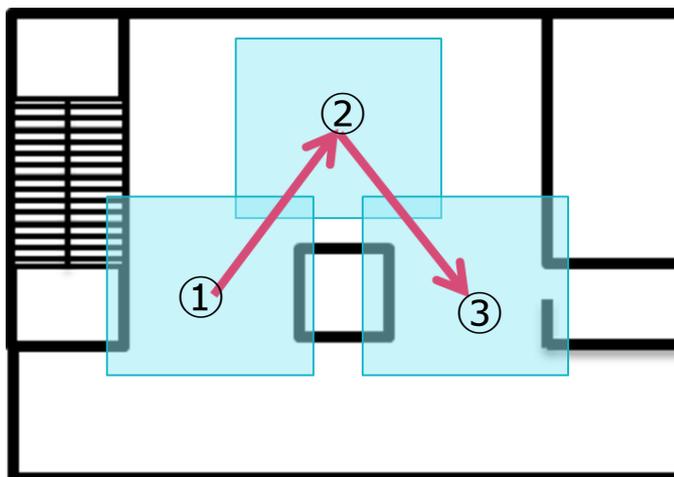
外部カメラ情報のみを使用したロボットナビゲーション(センサーレスナビゲーション)を実装し、ある経路に従ってロボットに自律移動を行わせる。想定した経路と実際に通行した経路の誤差を計測し評価することで、外部カメラの情報のみでロボットが自律移動できることを確認する。

検証項目

1. 速度別ナビゲーション精度の比較
2. 速度別移動経路の比較

検証手順

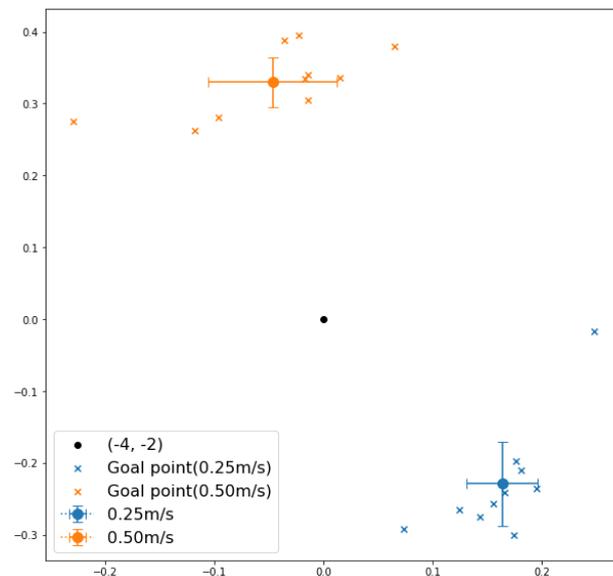
1. ①から③までの経路をDWA(Dynamic Window Approach)を用いて自律移動させ、その移動軌跡を記録
2. 統合位置情報を解析



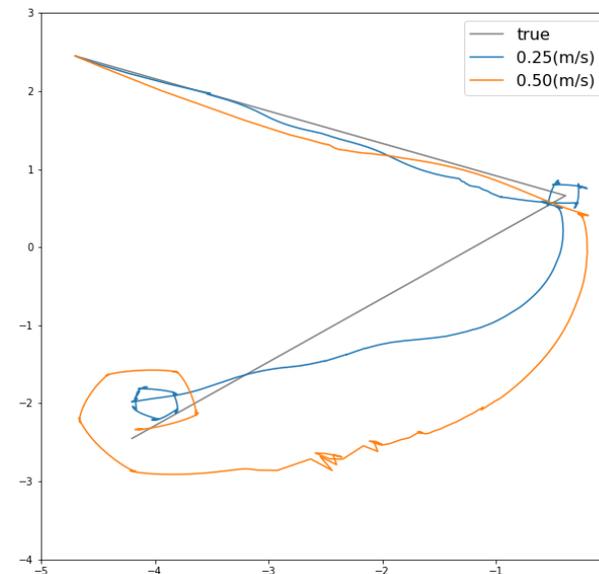
実証環境のカメラの視野範囲とロボットの移動経路
青い四角はカメラの視野範囲、矢印は移動経路を表す

検証結果

- 移動する速度がナビゲーション精度に影響を与えることを確認
 - ナビゲーションの結果、右図に示すポイントへの移動を確認
 - 指定した座標に対する誤差平均は以下の通り
 - 0.25[m/s]: 0.281m
 - 0.50[m/s]: 0.333m
 - 速度の増加に従い、蛇行するような動きを取ることが確認された



ナビゲーションによる移動結果と信頼区間(95%)



ロボットの移動軌跡の比較(移動速度別)

考察

外部カメラを用いて、ロボットの位置推定だけでなくそれを基にしたナビゲーションシステムを実装した。本検証環境の場合、指定した領域へのロボットナビゲーションが可能であることが示された。よってセンサーを持たない安価なロボットでも、外部カメラの情報を用いることで自律移動が可能であるといえる。

問題点として、ロボットは与えられた座標間を蛇行するように走行してしまうため、障害物があった場合衝突する恐れがある。本検証環境の場合、秒速0.7メートル以上で走行させると蛇行が大きくなり、壁にぶつかる経路を取ることが確認された。原因として、ロボットが超信地旋回をする際にはタイヤのスリップが多く、指定した角度へ正確に向くことが難しい。そのためロボットが②の地点に到達し、③へ向かって超信地旋回した直後はロボットの姿勢（特に向き）が安定せず、その後③へ走り出した際に蛇行する結果となったと考えられる。安全性を求めるのであれば、超信地旋回後の初動をゆっくりと走り出すようにし、ロボットの方角が正しいことが確認された段階で増速させるなど蛇行が少なくなるようにDWAのアルゴリズムを調整するなどの工夫が必要となる。

3. まとめ

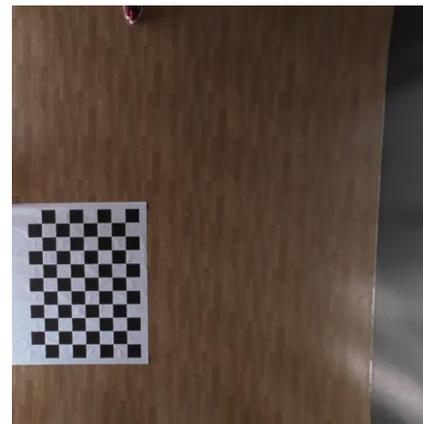
実装した各機能を使用して検証①～④を実施した結果、実装した機能については、想定通りの結論を導く手法は確立できたと判断する。ただし、技術的観点・社会的観点を考えると以下課題があり、これらの課題を解決していく必要があると考える。

技術的課題 1：カメラキャリブレーションによる視野範囲の縮小

キャリブレーションによる歪み補正によって位置推定精度の向上は確認されたが、カメラの視野範囲が縮小されてしまう問題がある。本検証の場合、キャリブレーション後の視野範囲は凡そ5.5m四方となり、キャリブレーション前と比べて大きく狭まっていることがわかる(下図)。原因としてキャリブレーションに使用したチェッカーボード画像に偏りがあることが考えられる。本来はチェッカーボードをカメラ視野周辺部に配置した画像を含むべきであるが、建物の制約上困難であったことから、チェッカーボードの配置が中心部に寄ってしまったことで、キャリブレーション結果が中心に寄った配置になったと考えられる。



キャリブレーション前



キャリブレーション後

キャリブレーション前後の画像比較

技術的課題 2：カメラの物理的誤差の補正

検証②では人為的にカメラに誤差を生じさせていたが、実際の運用では設置機器の経年劣化等の外乱によってカメラ位置が変わる可能性がある。検証では1台のみであったが、すべてのカメラに誤差が生じた場合、実際とは異なる場所にロボットがいると推定する可能性がある(誤差の影響を抑えるためにカメラ台数を増やす手段も考えられるが現実的ではない)。本実証ではカメラ間の位置関係が不変であるということを前提にカメラの位置関係を定数で設定していた。しかし実際の運用を考えた場合、カメラの位置関係の変化をカメラからの情報から推定し、補正するような仕組みが必要になると考えられる。

技術的課題 3：ロボットによる危険行為の定義

検証③では禁止エリアへロボットが侵入したことを検知した。ここでは禁止エリアとして位置情報のパラメータを設定していたが、実際にはロボットやカメラ、それらの制御PCおよびネットワーク環境によって、停止するまでの時間や距離が異なると考えられる。そのため、これらをパラメータとして禁止エリアを定義する仕組みが必要であると考えられる。また実社会においては車道や横断歩道などへの侵入だけでなく、人や駐輪した自転車等との衝突も危険行為として考えられる。これらはあらかじめ禁止エリアとして定義するものではないため、AIによる人やオブジェクト認識等を用いて禁止エリアを設定する必要がある。ただし、禁止行為を厳密に定義しすぎると、ロボットの移動を妨げてしまう可能性がある。より安全なロボットの運用のためには、ロボット内部およびカメラを用いた外部システムによる監視が必要ではあるが、ロボットの運用を妨げない程度の自由度を考える必要がある。

技術的課題4：カメラを用いた地図情報の取得

現在商用利用されているロボットの多くは、LiDARやカメラ等を用いて周辺の障害物情報が記載された地図データをあらかじめ作成しナビゲーションを行うのが一般的である。しかし検証③で用いたセンサーレスナビゲーションでは地図データを用いていない。そのため周囲の障害物を考慮せずに経路計画を行ってしまうため、衝突する危険性がある。これを解決する単純な方法としては、ロボットの導入時にセンサーを持ったロボットを走行させ、地図データを作成することであるが、これは手間とコストを必要とする。これを解決する方法の一つとして、外部カメラから得られた情報を基にした地図データの作成が可能となれば、センサーを持ったロボットが不要となり、地図を作成する手間とコストを抑えロボットの低廉化の推進につながると考えられる。

また既存技術と比較した本研究のメリットとして以下が考えられる。

技術的メリット：複数カメラによる位置推定とナビゲーション

複数台のカメラを連携することでより広範囲でのロボット制御を可能となった。またカメラ情報を用いた自律移動によって、センサーを持たないロボットでのナビゲーションが可能となった。これによってロボットの低廉化が進み、導入コストが抑えられることで、ロボット需要の拡大につながると考えられる。

社会的メリット：安心・安全なロボット普及社会への貢献

ロボットの安全性を保障するために、各ロボットベンダーやサービスプロバイダーによって技術開発が行われているが、機体の不備や動作不良等のリスクはゼロにするとは難しい。ロボットを各社だけでなく社会全体で保証することが、ロボットの普及につながると考えられる。本実証で検証した外部カメラによるロボットの危険検知機能を、社会システムとして実装できれば、安心・安全なロボット普及社会への貢献が期待できる。

県内ロボット産業振興

ロボットの危険検知機能を地域社会に実装することで以下の効果が期待できる

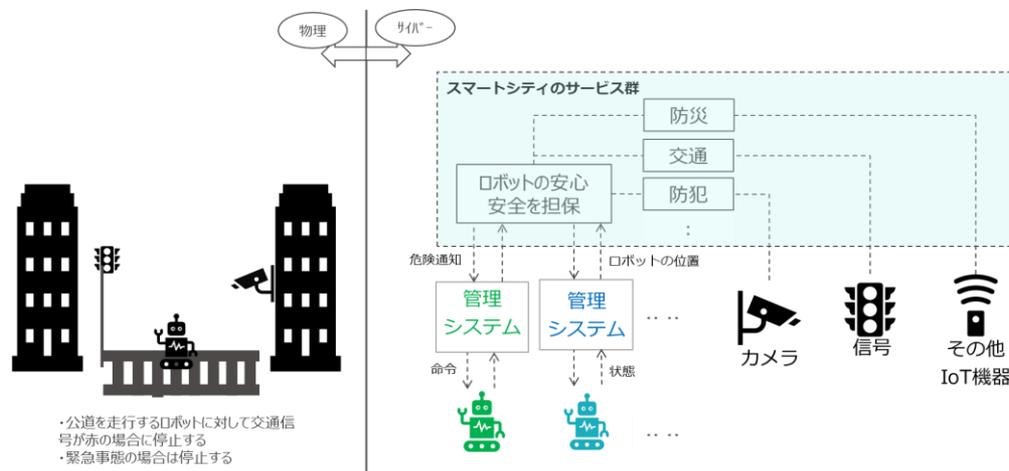
- 県内の中小企業やサービス企業などサービスロボット導入に貢献
- 地域社会での安心・安全なロボット運用
- 高価センサーや自律移動、交通ルールの実装を不要とすることで、県内メーカーのロボット参入を可能に
- 県内ロボットメーカーが開発している遠隔操作ロボットを自律移動ロボットとして利用可能

県内企業へのアプローチ

- 会津大学や自治体、県内ロボットメーカーが多く所属する会津ロボットデュアルウェア研究会（ARDuC）等や自治体と連携し本研究の成果を使用した検証を企画
- 弊社が提供するロボットプラットフォームに本研究の成果を搭載し、様々な県内のロボットメーカーが提供する自律移動ロボットが安心・安全な動作を可能に
- 県内企業とサービスロボットインテグレータ事業を推進できる体制を構築
⇒ロボットサービスのインテグレーションから運用保守を睨んだ体制の構築

各社がロボットの機体とその制御システムといった実装範囲内で安心・安全な動作を担保していると考えられるが、実際の運用では考慮すべき外界情報は多岐にわたる。ロボットの実装範囲外にある外部システムからも同様に安心・安全を担保することで、ロボットの社会普及のための社会全体でのFail-Safeの実現に近づくことができると考えられる。たとえば、従来の自律移動ロボットはロボットメーカー・サービスベンダーらが提供するFMS(Fleet Management system)による自社管理が一般的だが、より上位システムにロボットの安心・安全のためのロボット監視機能を実装し、公道走行するすべての自律移動ロボットを常に監視し必要に応じてアドバイスや指示を送ることで、社会全体として安心・安全をより向上させることができる。またロボットの情報だけでなく、交通信号や災害・ロボット自身の異常などロボット自身では認識できない情報をロボットに提供、または情報を基にロボットへの停止指示を通知するなどが可能になる。

弊社はこのFMSよりも上位のシステムを今後実現が進むスマートシティが具備すべき標準機能と捉え、ロボットが普及したスマートシティ実現に向けたルール・基準・標準化の提言、リファレンス実装を行いロボット公道走行事業へつなげる。



THANK YOU

ITで、社会の願い叶えよう。



TIS INTEC
Group