

# 複数台建設ロボットの相対位置計測情報を用いた自己位置・姿勢補正

○松田 恭岳 (東京大学), 谷島 諒丞 (東京大学), ルイ笠原 純ユネス (東京大学),  
永谷 圭司 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

## Correction of Position and Posture Estimation Based on Relative Position Measurements for Multiple Construction Robots

○ Yasutake MATSUTA, Ryosuke YAJIMA, Jun Younes LOUHI KASAHARA,  
Keiji NAGATANI, Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : Accurate self-position and posture estimation is important for mobile robots including construction robots, and a high-performance correction method of the estimated values is required. Cooperative correction methods can cope with cases where non-cooperative methods fail. However, they have problems such as the flexibility of position and posture of each robot. This research proposes a correction method for the estimated values position and posture based on measured self-positions and postures, and relative position measurement between robots, using multiple construction robots. In experimental results using substitutes for construction robots, it was confirmed that the proposed method reduced errors in the estimated values.

### 1. 緒言

#### 1.1 背景

毎年様々な自然災害が日本各地で発生しており、応急復旧の技術開発が期待されている。災害対応における課題として、人が行けない場所における作業の必要性が挙げられる。これに対し、自律的に行動する建設機械のロボットに作業を代替させることが提案されている [1]。ここでは、未知の環境においてロボットが状況に応じて、自律的に対処する能力が必要となるが、複数台のロボット群 (群ロボット) に協働させることで課題を解決させる手法が提案されている。

建設機械をはじめとして、自律移動ロボットには自己位置・姿勢の推定が重要である。一般的に、屋外における自己位置推定には、Global Navigation Satellite System (GNSS) が使用される。そのため、本稿では自己位置推定手法として GNSS を想定する。GNSS 衛星からの信号に対し、位置が既知の基準点との観測位相差から求める相対位置を活用する、Real Time Kinematic 測位 (RTK-GNSS) では、50 mm 未満の測位精度がある。しかしながら、この高い精度は GNSS の電波条件や補正情報が整い、計算値が収束した fix 解が得られたときの値である。実環境においては、ロボットが作業のために電波の届きにくい場所に進入するなど、これらの条件が整わず、精度の悪い float 解が得られる場合や、GNSS だけでは位置推定ができない場合がある。精度が低い状態で作業を続けることは好ましくないが、float 解から fix 解に戻るには 10 分程度要する場合もあり、float 解では作業を中断し、fix 解取得

を待つことは非効率的である。

一方で、方位の推定については、慣性センサや地磁気センサなどを備える Inertial Measurement Unit (IMU) の情報から位置や方位等を算出する、Inertial Navigation System (INS) と GNSS とを組み合わせた手法がよく用いられる。しかし、慣性センサは累積誤差、地磁気センサは周囲の強磁性体の影響を受けるなど、推定精度を低下させる要因がいくつも考えられる。

ロボットの高精度かつ効率的な移動・作業を実現させるためには、位置・姿勢の測定精度を向上させる、補正手法の開発が重要である。

#### 1.2 先行研究

GNSS による自己位置推定の補正手法は広く研究されている。誤差の原因となる電波を特定、除外する手法 [2] は、電波遮断下で使用出来ない。短時間の電波遮断にも対処可能な手法として、Light Detection And Ranging (LiDAR) 等のデータを用い、環境地図とのマッチングを行い自己位置を補正する手法 [3] は、詳細な環境地図の準備が必要である。GNSS の情報に、IMU から得られた加速度・角速度を積分した移動量を組み合わせ、位置情報の補正を行う手法は、累積誤差が問題として残る。このように、ロボット単体で完結するシステムだけでは不十分である。

一方で、複数台のロボットで協調して位置の推定や補正を行う手法が存在する。協調ポジショニングシステム [4] は、あるロボットの移動後の位置を、他の 2 台のロボットの各位置情報と相対位置計測情報から計算するという手法

である。しかし、この手法は計測時には各ロボットが停止する必要性と、編成を組んだまま移動する必要性が問題である。これに対し、複数台の Unmanned Aerial Vehicle (UAV) 群において、GPS の信号を損失した機体について、正常な UAV 群の位置情報と、それらから計測した相対距離・角度を用い位置を推定する手法がある [5][6][7]。しかしながら、これらのシステムでは UAV 群の幾何学的位置関係がその精度に重要であり、各機が 3 角形の頂点に位置することを想定した計算処理を行っている。UAV と比較して、建機ロボット群は、隊列を組んだり、常に近くに別の個体が居たりすることは少ないと考えられる。そのため、各ロボットの配置が直線に近い場合や、計測範囲内のロボットが変わる場合等の考慮が必要である。また、これらの UAV を用いた論文では、シミュレーションのみの実験で UAV やセンサの実機を用いていないことや、相対距離計測手法の詳細について述べられていないことも多い。RTK-GNSS のように、高い位置推定精度を持つ手法の補正には、相応の精度が求められるため、実機で高い性能を示す手法の提案が求められる。さらに、情報処理に集中管理的な手法が用いられていることが柔軟性における課題となる。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、あるロボットの GNSS を用いた推定自己位置、INS 等を用いた推定自己姿勢の精度が低下し、真値とずれが生じるといった異常が発生した場合に、これを補正できるようにすることである。

そこで、複数台建設ロボットによる、各推定自己位置・姿勢情報と相互計測結果を利用した、GNSS の信頼度が低い個体の推定自己位置・姿勢を補正する手法の提案を行う。本研究では、先行研究に対し、より少数の編成、より多様な配置においても利用可能な手法とし、計測から補正まで実際のセンサを用いて性能の検証を行う。

## 2. 提案手法

### 2.1 概要

本研究では、1.3 節で述べた目的を達成するための具体的な研究対象として、工事現場において、複数台のバックホウ・ダンプトラックなどからなるロボット群が存在し、協働しながらタスクを進める状況を想定する。作業現場では、場所や時間により GNSS の精度が悪い状況で作業を進める場合が考えられる。ここで、GNSS で fix 解が得られたならば位置・姿勢推定精度は高いと仮定して、推定精度の高い個体を fix 解個体、低い個体を float 解個体と定義する。本研究では、推定自己位置・姿勢の推定精度が低下

した float 解個体について、周囲に存在する fix 解個体の位置・姿勢と、相対位置計測結果を用い、float 解個体の位置を計算することにより、位置・姿勢の補正を行う。ここでは、自律分散のため、補正に関する情報は無線で周囲のロボットに伝達する。なお、本論文では、個々が移動しうる群ロボットにシステムを搭載する準備として、ロボットの台数を固定し、各個体が静止した状態で、相互計測と推定自己位置の補正に取り組む。また、実験では建機やセンサは代替品を使用して、手法の検証を行う。

### 2.2 問題設定

2.1 節で述べた状況として、作業現場に  $n$  台のロボットが存在する状況を考える。各個体には、GNSS 受信機と INS が取り付けられ、自己位置・姿勢の推定が可能であるとする。また、環境認識用の LiDAR も取り付けられており、周囲の物体の距離情報を点群データとして取得可能であるとする。実際には、各ロボットが移動し作業を行うため、各計測範囲内に入った他個体を検出する必要があるが、今回は簡単のため、各個体の LiDAR 観測範囲内に他個体が最低 1 台存在し、ロボットの他に検出される物体は存在しないものとする。また、各個体の形状については既知とする。各個体は自身が fix 解個体か float 解個体か、すなわち自身の GNSS の状態について、精度が高い fix 解が得られているか否かの把握が可能であるとする。ここで、作業の最中に、ある個体が、fix 解が得られなくなり自己位置・姿勢推定の精度が悪くなるという状況を考える。本手法では、自己位置・姿勢の推定値が正常な、float 解個体が最低 1 台存在すると仮定する。なお、LiDAR の故障や、精度低下については考慮しない。簡単のため、全ての計算は 2 次元座標上で行うが、これは 3 次元空間へと拡張することが可能である。

### 2.3 自己位置推定

各ロボット  $i$  は、GNSS と INS により、Fig. 1 に示すように、グローバル座標系  $XY$  座標系における  $X$  座標  $X_i$ 、 $Y$  座標  $Y_i$ 、ヨー角  $\theta_i$  を取得する。この点を、ロボット  $i$  の座標系、 $x_i y_i$  座標系の原点とする。なお、簡単のため原点はロボットの中心と設定する。

### 2.4 相対位置推定

各ロボット  $i$  は LiDAR $i$  により他のロボット  $j(j \neq i)$  表面の点群を計測し、LiDAR $i$  座標系における距離と角度情報を得ることが可能である。この情報から相手の位置について計算する。

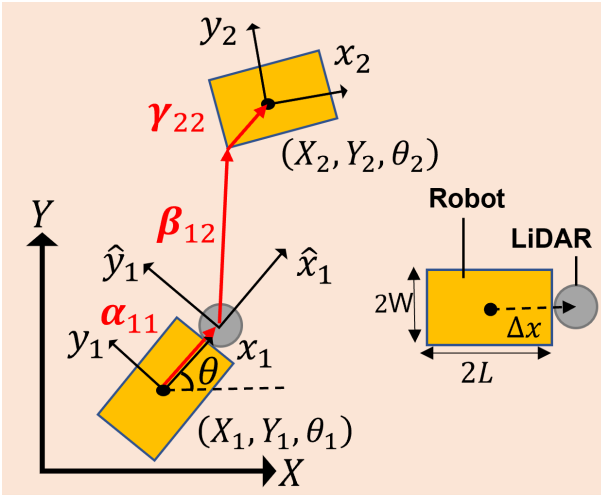


Fig. 1: Coordinate systems and variables.

LiDAR $i$  座標系を  $\hat{x}_i\hat{y}_i$  座標系とすると,  $x_iy_i$  座標系における  $x_jy_j$  座標系の原点の位置, すなわちロボット  $i$  から見たロボット  $j$  の原点の座標  $(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$  は, ロボット  $i$  座標系における LiDAR $i$  座標系の原点の位置  $\alpha_{ii}$ , LiDAR $i$  で計測したロボット  $j$  の最も近い点 (最近傍点) の位置  $\beta_{ij}$ , 計測したロボット  $j$  の最近傍点から見たロボット  $j$  座標の原点の位置  $\gamma_{jj}$  を用い,

$$(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij}) = \alpha_{ii} + \beta_{ij} + \gamma_{jj}, \quad (1)$$

と表すことができる.

簡単のため, 各ロボット  $i$  の座標系  $x_iy_i$  座標系と LiDAR $i$  の座標系  $\hat{x}_i\hat{y}_i$  座標系は,  $x$  軸が同一直線上にあり,  $\Delta x$  だけ離れているものとする. また, 各ロボットの形状を, 長手方向に  $2L$ , 短手方向に  $2W$  で, 十分な高さを持つ直方体と近似する.

ここで, 2.1 節において, LiDAR の計測範囲内にはロボットしか検出されないと仮定したことを確認する. LiDAR $i$  で計測した点群について, 各建機へとクラスタリングを行った後, 計測範囲内に存在する他のロボット  $j$  の最近傍点について, LiDAR $i$  極座標系における距離  $d_{ij}$  と, 偏角  $\phi_{ij}$  を抽出する. Fig. 2 の通り, 最近傍点はロボット  $j$  の角もしくは側面である. そのため, 最近傍点がロボット  $j$  のどの位置に相当するかを計算し,  $\gamma_{jj}$  を求める.

今回,  $\gamma_{jj}$  を求める簡単な方法として, 最小二乗法を利用する. 点群データに関して, 最近傍点からそれぞれ左右に向かって, ロボット  $j$  を計測したと考えられる部分を,  $\mathbf{e}_{j_m}$  ( $m = 1$  (left),  $0$  (right)) のように表し, その存在範囲の長さを  $\|\mathbf{e}_{j_m}\| = l_{j_m}$ ,  $\hat{x}_i$  軸と  $\mathbf{e}_{j_m}$  のなす角を  $\psi_{j_m}$  とする.  $\psi_{j_m}$  の導出には,  $\hat{x}_i\hat{y}_i$  座標系に投射された点群データについて, 最小二乗法を用いる. このとき, 左右の傾きの値の積  $\prod \psi_{j_m}$  が  $-1$  に近い場合は角を, そうでない場合は側面を検出したと判定する.

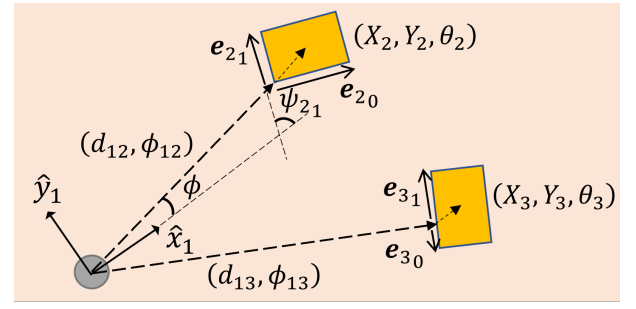


Fig. 2: Corner and side detection with LiDAR.

続いて, ロボットの形状の対称性を考慮し, 角を検出した場合は各辺の長さ  $l_{j_m}$ , 側面を検出した場合はその和  $\sum l_{j_m}$  が, 長手方向  $2L$ , 短手方向  $2W$  のどちらに相当するかを判定する.

$(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$  が求まるとき, 中心間の距離  $\tilde{d}_{ij}$  と向き  $\tilde{\phi}_{ij}$  は, ロボット  $i$  極座標系を用い, それぞれ以下のように表される.

$$\tilde{d}_{ij} = \sqrt{\tilde{x}_{ij}^2 + \tilde{y}_{ij}^2}, \quad (2)$$

$$\tilde{\phi}_{ij} = \arctan \frac{\tilde{y}_{ij}}{\tilde{x}_{ij}}. \quad (3)$$

## 2.5 誤差の計算

2.2 節で述べたように, 各ロボットは, fix 解を得ているか, すなわち, 自身の自己位置推定の精度が高いか否かは認識していると仮定した. そのため, 自己推定位置・姿勢の精度が高い fix 解個体ロボット  $i_+$  が, fix 解を持たない float 解個体ロボット  $j_-$  についてのみ, 相手の推定自己位置 (推定位置) と, 計測値から計算した位置 (計算位置) とを比較する.

各ロボットは周囲のロボットに向け, 自身の推定位置と GNSS 状態を無線で伝達する. ロボット  $i_+$  ではまず, 計測範囲内のロボット  $j$  のうち, fix 解個体  $j_+$  を計算対象から除外する. ここで,  $XY$  座標系において, 各ロボット  $i$  から見たロボット  $j$  の計算位置  $(\tilde{X}_{ij}, \tilde{Y}_{ij})$  は,

$$\tilde{X}_{ij} = \tilde{d}_{ij} \cos(\tilde{\phi}_{ij} + \phi_i) + X_i, \quad (4)$$

$$\tilde{Y}_{ij} = \tilde{d}_{ij} \sin(\tilde{\phi}_{ij} + \phi_i) + Y_i, \quad (5)$$

となる. これより, ロボット  $i_+$  が検出した各計算位置の中から, ロボット  $j_+$  の推定位置  $(X_{j_+}, Y_{j_+})$  に最も近い位置にいるロボットを除外する.

その後, float 解個体のロボット  $j_-$  について考える. ロボット  $j_-$  の推定自己位置の精度が悪い場合も, その位置のずれのオーダーはそれほど大きくはないと仮定すると, 残りの計算位置に最も近い推定位置を持つ個体がロボット

$j_-$  であると考えられるため、以下の式 (6) において、最も小さな  $\delta$  を満たす対象をロボット  $j_-$  とした。

$$(\tilde{X}_{i_+j_-} - X_{j_-})^2 + (\tilde{Y}_{i_+j_-} - Y_{j_-})^2 \leq \delta^2. \quad (6)$$

このロボット  $j_-$  の位置情報  $(\tilde{X}_{i_+j_-}, \tilde{Y}_{i_+j_-})$  と、誤差と相対距離の比  $\delta/\tilde{d}_{i_+j_-}$  の値を、ロボット  $i_+$  からロボット  $j_-$  に伝達する。

## 2.6 位置・姿勢の補正

2.5 節で述べた手法により、ロボット  $j_-$  はロボット  $i_+$  からの情報を受け取り、自己位置・姿勢の補正を行う。

まず、以下のように  $(\tilde{X}_{i_+j_-}, \tilde{Y}_{i_+j_-})$  をもとに推定位置の補正を行う。

$$(\bar{X}_{j_-}, \bar{Y}_{j_-}) = \begin{cases} (\tilde{X}_{i_+j_-}, \tilde{Y}_{i_+j_-}) & (\text{if } \delta/\tilde{d}_{i_+j_-} \geq \epsilon) \\ (X_{j_-}, Y_{j_-}) & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (7)$$

今回補正に用いる閾値  $\epsilon$  は、実験での性能に基づき 0.05 m と設定した。複数台のロボットから情報を受け取った場合は、 $\delta/\tilde{d}_{i_+j_-}$  の値が最も大きい対象からの情報を参照する。

続いて、姿勢の補正を行う。ロボット  $j_-$  では、補正後の位置をもとに計算した他のロボットの位置に矛盾が生じないように、以下のように姿勢を補正する。

$$\bar{\theta}_{j_-} = \begin{cases} \Delta\theta & (\text{if } |\Delta\theta - \theta_{j_-}| \geq \zeta) \\ \theta_{j_-} & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (8)$$

ただし、

$$\Delta\theta = \arctan \frac{Y_{i_+} - \bar{Y}_{j_-}}{X_{i_+} - \bar{X}_{j_-}} - \tilde{\phi}_{j_-i_+}, \quad (9)$$

である。今回閾値  $\zeta$  は、0.01 rad と設定した。ここで、他のロボットが対称的な位置に存在する場合、姿勢を誤った向きへと補正する場合がある。そのため、補正後の相対位置計測において矛盾が生じ続ける場合は、補正に用いる  $i_+$  を変更する。

## 2.7 補正の波及

2.6 節で述べた手法は、fix 解個体のロボット  $i_+$  が、周辺に存在する float 解個体のロボット  $j_-$  について対処する方法である。しかしながら、各ロボットの配置に関して、fix 解が得られない部分が広く、fix 解個体はその場所のロボットを直接計測できない場合など、float 解個体の近くに fix 解個体が存在しない場合も考えられる。そのため、補正後の float 解個体は補正後の自己位置・姿勢を用い、補正前の float 解個体の補正を行うことにより、位置・姿勢の

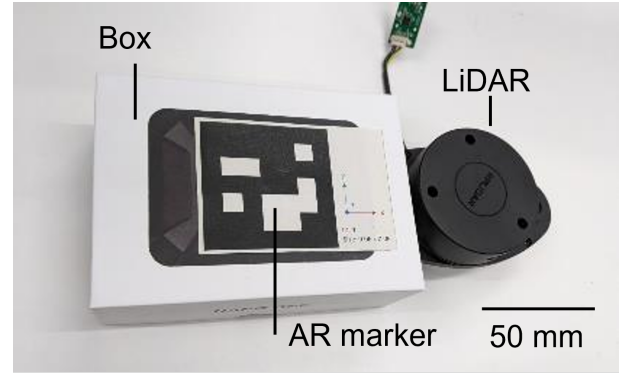


Fig. 3: Substitute for robot.

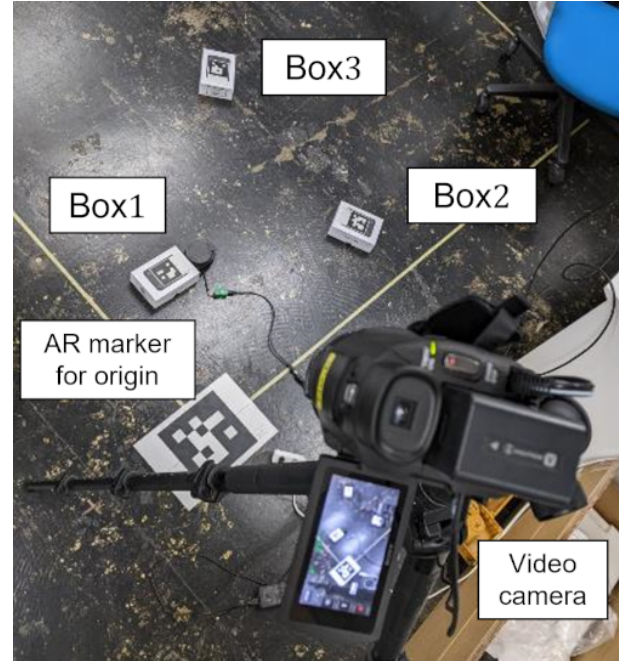


Fig. 4: Experiment with 3 boxes.

補正を波及させる。ここでは、fix 解個体からの情報、補正後の float 個体からの情報の順に優先度・信頼度を設け、2.5 節、2.6 節の手法に則り計測・情報の伝達・補正を繰り返すことで、末端まで位置・姿勢の補正を波及させる。

## 3. 実験

2章で述べた提案手法を評価するために、3台のロボットが存在する状況を想定し、2.6 節までについて実験を行う。

### 3.1 実験環境

本実験は、1台のノート PC と ROS2 foxy を用い情報を処理した。本実験においては、最初のステップとして屋内で検証を行うため、GNSS の代わりとして、AR マーカを用い自己位置・姿勢推定を行った。周辺計測用の LiDAR

は、SLAMTEC 社製の RPLIDAR A1 を 1 台用いた。建機ロボットの代替に、 $2L \times 2W = 0.14 \times 0.10$  m の箱 (Fig. 3) を 3 つ用いた。箱は、室内の実験室の床に配置する (Fig. 4)。ここでは、LiDAR の計測範囲に箱以外が入らないように注意するが、別途箱が最も近い検出対象となるように処理範囲を設定する。AR マーカは、Sony 社製のビデオカメラを用い検出した。ビデオカメラは、原点用の AR マーカを用い、事前にキャリブレーションを行った。

### 3.2 実験手順

簡単のため、3 つの箱を各近傍点の向き  $\phi_{ij}$  が指定した計測範囲に来るように姿勢  $\theta_i$  を調整し設置し、その計測範囲内では他の箱が最も近い物体として検出されることを確認した。各 AR マーカをカメラで取得し、計測情報をノート PC に送った後、原点用 AR マーカを原点とした  $X$  座標  $X_i$ 、 $Y$  座標  $Y_i$ 、ヨー角  $\theta_i$  へと変換し、ノート PC 上に記録した。続いて、ある 1 つの箱の前方に、AR マーカの  $x$  軸と LiDAR の  $x$  軸が同一直線上に重なるように配置し、LiDAR で周辺の情報を取得し、記録した。このとき、カメラと各 AR マーカの距離は 1.5 m 程度、LiDAR と各計測対象までの距離は 0.5 m 程度であった。用いた LiDAR は 1 台であるため、別の箱では LiDAR のみ置きなおし計測した。ここでは、いずれの場合もロボットの中心と LiDAR の距離  $\Delta x$  は、 $\Delta x = 0.12$  m であった。その後、3 台分の位置情報・周辺計測情報を用い、情報処理を行った。

続いて各ロボットの情報処理について説明する。各ロボットは、自身の位置情報を受信した後、周辺のロボットに向け現在の推定自己位置と fix 解個体か否かを発信する。また、各ロボットは自身の前方に置いた LiDAR の情報の取得と、周辺のロボットの推定自己位置を受信を行う。以上により、ロボット  $i$  では、各ロボットの座標と、自身前方の LiDAR データを保持する。各ロボットは、これらの情報を用いて、提案手法に基づく計算処理を繰り返した。これらの処理は、自律分散を想定し、同一のプログラムを別々のターミナルで 3 つ同時に実行した。

まず、AR マーカからの位置情報をそのまま用い、自己位置推定に問題がない状態で、計算位置の精度を確認した。その後、3 台中 1 台の位置・姿勢情報について、AR マーカの計測値に異常を加え、fix 解が得られない状況を再現し、提案手法の性能を確認した。異常については、推定位置・姿勢共に時間に比例して増加するような誤差を生じさせた。この異常を加えない状態を fix 解、加えた状態を float 解ととらえ、GNSS の状態として使用した。

Table 1: Measured position and calculated position of Box2.

	Mean Value [m]
$X_2$	0.76
$\tilde{X}_{12}$	0.75
$ \tilde{X}_{12} - X_2 $	0.01

### 3.3 実験結果

各センサの値が安定した状態で、箱 2 について、AR マーカを用いて得た推定位置の  $X$  座標  $X_2$  と、2.5 節で述べた手法を用い箱 1 で求めた計算位置の  $X$  座標  $\tilde{X}_{12}$  について、各平均値を Table 1 に示す。本実験における各箱・LiDAR の位置関係では、推定位置・計算位置の  $X$  座標は 0.01 m 程度ずれていることが確認された。

続いて、補正性能について、箱 1 の推定位置 ( $X_1, Y_1$ ) と姿勢  $\theta_1$  に、時間に比例するような誤差が与えられた場合の反応を調べた。なお、今回時間については処理の回数 Step を用い、Step=100 以降に誤差を加えた。 $X$  座標、 $Y$  座標、姿勢の結果をそれぞれ Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c) に示す。各図において、青線が AR マーカで得た位置・姿勢の計測値、橙線が誤差追加後の推定値、緑線が補正後の計算値を表す。補正後の  $X$  座標、 $Y$  座標、姿勢は、いずれも AR マーカで得た計測値と多少ずれた値で安定しており、ノイズも見られたものの、基本的には補正前よりも計測値に近づいた。なお、Fig. 5 において補正後の誤差は位置が約 0.02 m、姿勢が約  $\pi/180$  rad であり、この位置の誤差は、箱同士の相対距離の約 3% であった。

## 4. 考察

3.3 節の結果に関して、位置のずれは、本実験では箱と LiDAR 間のキャリブレーションを行わなかったことが原因だと考えられる。姿勢の補正は、補正後の位置をもとに計算を行っているため、位置の補正精度向上が姿勢の補正精度向上につながると思われる。一方で、計算値のノイズについては、LiDAR で物体を計測した際、物体の端では計測にむらが生じることで、2.4 節で述べた、最近傍点から見た相手の中心の位置  $\gamma_{jj}$  の計算結果に影響したものだと思われる。

今回行った実験では、計測距離が短いこともあり、補正後の位置の誤差は 0.02 m 程度であった。しかし、実際の建機で用いる場合は、相対距離が 10 m を超える計測を想定する必要があり、さらに補正の波及を行う場合には、その分誤差も増加、累積すると思われる。したがって、建機実機で用いるためには、補正の精度をより向上させる必要がある。

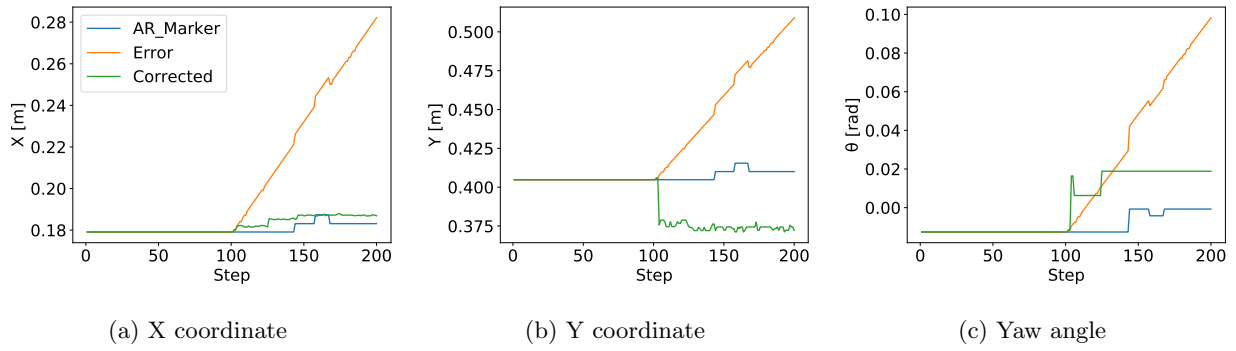


Fig. 5: Position and posture of Box1: measured values using AR marker (blue), after error adding (orange), corrected values (green).

現時点では、補正後の誤差軽減に関しては、ロボットとLiDARの間でキャリブレーションを行うことを、相対位置計測精度の向上に関しては、フィルタをかけノイズを抑えることによる対処を想定している。なお、相対位置の計算に関しては、本手法で用いた最小二乗法ではなく、LiDARで得られる点群データに対し、建機モデルとのマッチングを利用することにより、ロボット座標系の原点を中心以外に設定可能にすることも検討している。2.6節で述べたように、本手法ではfloat解個体の位置情報を、fix解個体1台分からの計算値に置き換えることで補正した。これにより、fix解個体の必要数は最低1台となっている。一方で、本実験のように周囲に複数台のfix解個体ロボットが存在する場合は、それらの計算値を統合的に利用することも、位置の補正精度向上につながると考えられる。また、今回は各ロボットが静止しているが、各ロボットが動く場合には計測・伝達の遅延や、計測値の分散の増加など、さらなる精度低下の要因がいくつも考えられるため、動的モデルに対応した手法への改良が求められる。

## 5. 結言

本研究では、あるロボットのGNSSを用いた推定自己位置・姿勢に、精度が悪くなる等の異常が発生した場合について、周囲の正常なロボットの推定自己位置と相対位置の計測結果を利用して、正常個体では異常発生個体の識別と、その推定位置の差を計算し、異常個体では推定自己位置・姿勢を補正するシステムを提案した。

実験では、推定自己位置・姿勢の誤差が低減されたことが確認された。

今後は、キャリブレーション、ノイズ軽減のためのフィルタの実装のほか、2.7節に述べた補正の波及性能も検証するため、異常個体数や異常の種類、配置のパターンなどを変えた実験や、より実機に近い形状の模型を用いた実験を繰り返し、手法の改善を試みる。また、現在は、建機実機とGNSS、3次元LiDARを用いた実験による性能評価

を計画している。さらに、各ロボットが静的な場合だけでなく、動的な場合でも利用可能な手法も検討している。

## 謝辞

本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業グランド番号 JPMJMS2032 の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] 永谷圭司, 阿部雅人, 大須賀公一, 全邦釘, 岡谷貴之, 西尾真由子, 松原崇充, 筑紫彰太, 池本有助, 浅間一: “「開いた設計」によるインフラ構築/災害対応ロボット技術の開発”, AI・データサイエンス論文集, vol.2, no.J2, pp.1-7 (2021).
- [2] 久保幸弘, 藤田征吾, 杉本末雄: “GPS 搬送波位相および擬似距離観測に対する異常データの検出と測位精度の向上”, システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, vol.SCI06, p.216 (2006).
- [3] 平野大智, 米陀佳祐, 柳瀬龍, M. Aldibaja, 菅沼直樹: “LiDAR とミリ波レーダのフュージョンによる自己位置推定”, 自動車技術会論文集, vol.51, no.5, pp.824-829 (2020).
- [4] 広瀬茂男, 倉爪亮, 長田茂美: “群ロボットによる協調ポジショニング法”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.838-845 (1995).
- [5] Y. Qu and Y. Zhang: “Cooperative fault detection and recovery in the GNSS positioning of mobile agent swarms based on relative distance measurements”, Journal of Systems Engineering and Electronics, vol.22, no.1, pp.103-112 (2011).
- [6] Y. Qu, J. Wu and Y. Zhang: “Cooperative localization based on the azimuth angles among multiple UAVs”, Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp.818-823 (2013).
- [7] Q. Chen, Y. Meng, S. Li and Y. Liao: “Cooperative fault detection and recovery in the GNSS positioning of mobile agent swarms based on relative distance measurements”, Chinese Journal of Aeronautics, vol.35, no.5, pp.129-144 (2022).