

GPS データを用いた屋外搬送自律走行制御技術の研究

Research of Autonomous Running Control Technology used GPS data

酒井 宣年^{*1}, 麻植 雄樹^{*2}, 高田 勝弘^{*3}
SAKAI Nobutoshi, OE Yuki and TAKATA Katsuhiro

抄 錄

精密単独測位型 RTK (Precise Point Positioning RTK; PPP-RTK) の GPS データを用いた屋外搬送ロボットの自律走行制御手法に関する研究を行った。ティーチング走行で取得した位置情報をもとに自律走行時の GPS 位置情報を用いて、目標ポイント座標に追従した自律走行を行った。目標ポイント座標までの走行時に発生するルート誤差に対し、自動補正を行う制御手法を開発した。

1 はじめに

近年、各種産業現場において、作業効率の改善や安全確保、また労働力不足などの課題解決にロボット導入の検討が進められている。これまで主に物流倉庫や工場内の生産ラインで使用されている無人搬送においても自律走行制御ロボットに対する注目度は高く、屋外での用途拡大が期待されている。

汎用の無人搬送ロボットは、走行ルート上に設置された磁気テープを、磁気センサでトレースして走行するライントレース制御技術が一般的であり、路面環境が劣悪な屋外には適していない。近年、屋外での制御技術にはカメラ画像、また赤外線測域センサによる 3D マッピングなどを用いた自律走行制御の開発が進められている。しかし、これらの光学関連機器は、太陽光や反射光による外乱の影響を受けやすい。そのため、フィルタリング機能の強化や車内空間に設置するなど、ソフトおよびハード面に様々な対策を講じる必要があるため、容易に使用することが難しい。

当該自律走行制御手法は、オープン環境下の利点を生かして、高い位置座標精度である PPP-RTK 方式の GPS データのみで自律走行を可能とした走行制御技術であり、かつプログラミング化が容易であるため、様々な搬送ロボットへの実装が可能である。

2 方法

目標とする自律運転は、リスト保存している搬送ルート上のサンプリングポイントを、ポイント順に GPS 位置データをもとに追従した走行を行う。

本技術は、自律走行に必要である車体方向の認識、および補正方向、補正角、補正旋回動作時間など、すべての情報を本機搭載の GPS による位置情報から算出し、自律走行を実現した。

1) 目標ポイント座標と閾値到達条件

ルート上有るポイントにおいて、初期または通過直後のポイント座標を $P[i]$ 、次点のポイント座標を $P[i+1]$ とする。 $P[i+1]$ は現在走行座標からの目標ポイント座標である。なお、搬送車本体の現在位置を P_n (X_n, Y_n) とする。なお X および Y は、GPS より得られた経度座標、緯度座標である。

目標ポイント座標 $P[i+1]$ の $(X[i+1], Y[i+1])$ に対して許容範囲($\pm x, \pm y$)を設定し、許容範囲を目標ポイント座標への到達エリア範囲とする。車体の現在位置座標 P_n (X_n, Y_n) が、到達エリア範囲における閾値到達条件を満たすことにより、目標ポイントへ到達したと判断する。到達した後、それまでの $P[i+1]$ を $P[i]$ 、リストの次点ポイントを新たな目標ポイント座標 $P[i+1]$ に設定する。

閾値到達条件は、走行する方位により異なるため、 $P[i]$ および $P[i+1]$ の座標位置の関係性から目標とする走行方位を 8 方位にパターン分類し、閾値到達条件をポイント設定切替時に明確化する。閾値到達条件を表 1、方位パターン閾図を図 1 に示す。

*1 企画総務担当, *2 電子・情報技術担当,

*3 新明和工業株式会社

表 1. 方位パターンによる閾値到達条件

パターン番号	閾値到達条件
パターン 1 北	$Y_n \geq Y[i+1](-)$
パターン 2 南	$Y_n \leq Y[i+1](+)$
パターン 3 西	$X_n \leq X[i+1](+)$
パターン 4 東	$X_n \geq X[i+1](-)$
パターン 5 北西	$X_n < X[i+1](+)$ Or $Y[i+1](-) < Y_n$
パターン 6 南西	$X_n < X[i+1](+)$ Or $Y_n < Y[i+1](+)$
パターン 7 北東	$X[i+1](-) < X_n$ Or $Y[i+1](-) < Y_n$
パターン 8 南東	$X[i+1](-) < X_n$ Or $Y_n < Y[i+1](+)$

* 経度許容範囲数値 : x, 緯度許容範囲数値 : y

$$X[i+1](-) = X[i+1] - x$$

$$X[i+1](+) = X[i+1] + x$$

$$Y[i+1](-) = Y[i+1] - y$$

$$Y[i+1](+) = Y[i+1] + y$$

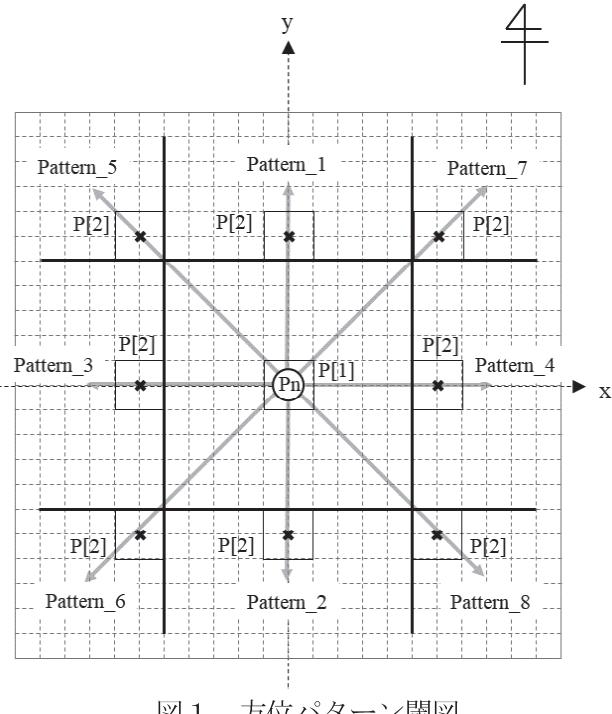


図 1. 方位パターン閾図

2) 目標ポイント座標と閾値到達条件

安定した自律走行を行うには、ポイント間での走行状態においても、適時の旋回補正が必要である。GPS データの演算処理から車体の走行方位、および補正に必要な目標方位を推定し、さらに補正量を算出することで、安定した自律走行を可能とする走行補正制御を考案した。

図 2 に示す走行位置の座標相関図を用いて、経度差および緯度差を用いた補正方向の算出方法を以下に示す。

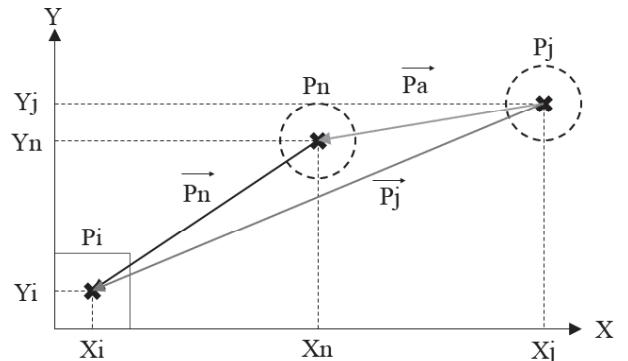


図 2. 走行位置の座標相関図

目標ポイント座標を P_i (X_i, Y_i)、車体の現在位置座標を P_n (X_n, Y_n)、1sec 前の車体位置座標を P_j (X_j, Y_j) とする。 \vec{P}_a は P_j から P_n 間の移動量であり、 \vec{P}_n , \vec{P}_j は目標ベクトルとなる。 \vec{P}_a は実際の走行により推移した GPS データ変化量より算出される走行ベクトルである。

P_i (X_i, Y_i) および P_n (X_n, Y_n) の位置座標の差分を経度差 x_s および緯度差 y_s とし、 P_i (X_i, Y_i) および P_j (X_j, Y_j) の位置座標の差分を、経度差 x_{so} および緯度差 y_{so} とする。算出式を式 (1) に、 \vec{P}_a のベクトル関係式を式 (2) に示す。

$$x_s = X_i - X_n$$

$$y_s = Y_i - Y_n$$

$$x_{so} = X_i - X_j$$

$$y_{so} = Y_i - Y_j \quad \cdots \text{式 (1)}$$

$$\vec{P}_a = \vec{P}_j - \vec{P}_n \quad \cdots \text{式 (2)}$$

経度方向移動量 x_u 、緯度方向移動量 y_u の算出式を式 (3) に示す。

$$x_u = x_{so} - x_s$$

$$y_u = y_{so} - y_s \quad \cdots \text{式 (3)}$$

\vec{P}_n および \vec{P}_a を、現在位置を基準とした xs-ys 軸座標として考え、 \vec{P}_n の目標方位角を θ_s 、 \vec{P}_a の進入方位角を θ_u とする。各ベクトルおよび方位角の相関図を図 3 に示す。 θ_s 、 θ_u は式 (4) より算出した。

$$\theta_s = \tan^{-1}(y_s / x_s)$$

$$\theta_u = \tan^{-1}(y_u / x_u) \quad \cdots \text{式 (4)}$$

\tan^{-1} により算出した方位角 θ_s および θ_u は、xs 軸を基準とした ($\square\pi/2 \sim 2/\pi$) 範囲で算出されることがから、演算結果の値からは P_a 、 P_n の相互関係は明らかとならない。そこで、xs 軸の正方向を基準とした回転ベクトルとして考えることにより、 \vec{P}_a 、 \vec{P}_n の相互関係を明らかとする。

\vec{P}_a および \vec{P}_n の回転角をそれぞれ θ_v 、 θ_w とした場合の回転ベクトル関係図を図 4 に示す。また、表 2 および表 3 に θ_v 、 θ_w の算出相関性を示す。

目標ポイントへの誤差補正に必要な補正角を θ_c とし、 θ_v および θ_w より算出した。

$$\theta_c = \theta_v - \theta_w \quad \cdots \text{式 (5)}$$

$\theta_c > 0$ の条件を満たす場合、 \vec{P}_a は \vec{P}_n に対し、遅れ位相であるため、左旋回による補正が必要となる。また、 $\theta_c < 0$ の条件を満たす場合、 \vec{P}_a は \vec{P}_n に対し、進み位相であり、右旋回による補正が必要となる。なお、 $\theta_c = 0$ の条件を満たす場合、 \vec{P}_a および \vec{P}_n が同一直線上であることから補正を必要としない。

但し、前述の条件のみでは、一方の回転方向の視点からみた補正結果となるため、絶対値 $|\theta_c|$ が π 以上の補正角による旋回を必要とする場合は、逆旋回を行うことが最適動作となる。表 4 に示す条件を追加し、最適な方向と補正角を得ることが可能となる。

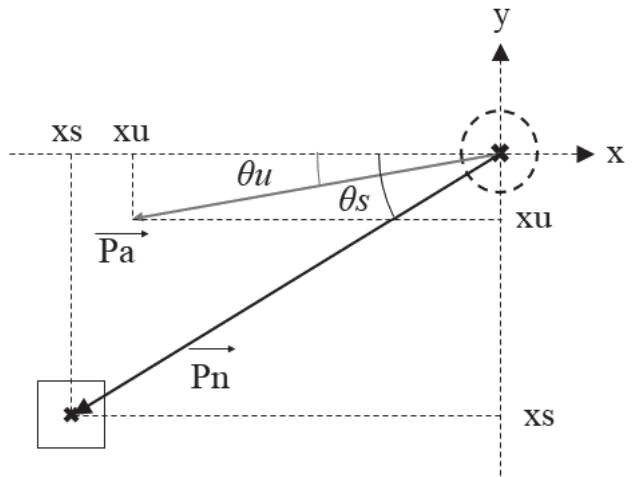


図 3. 方位角の相関図

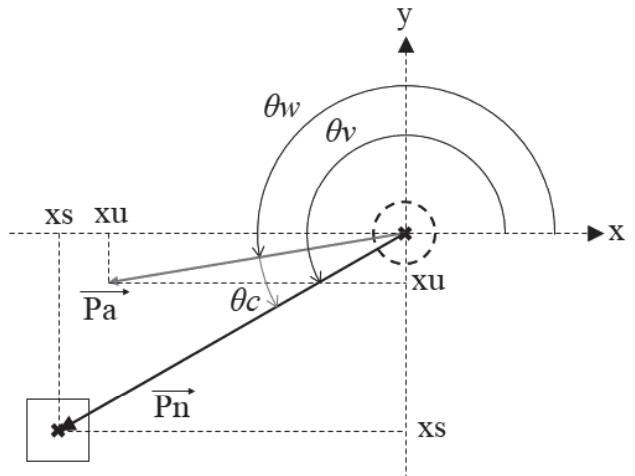


図 4. θ_v 、 θ_w 方位角の回転ベクトル相関図

表 2. θ_v の算出相関性

	$x_s < 0$	$x_s = 0$	$0 < x_s$
$y_s < 0$	$\theta_v = \pi + \theta_s$	$\theta_v = 3\pi/2$	$\theta_v = 2\pi + \theta_s$
$y_s = 0$	$\theta_v = \pi$	0	$\theta_v = 0$
$y_s < 0$	$\theta_v = \pi + \theta_s$	$\theta_v = \pi/2$	$\theta_v = \theta_s$

表 3. θ_w の算出相関性

	$x_u < 0$	$x_u = 0$	$0 < x_u$
$y_u < 0$	$\theta_w = \pi + \theta_u$	$\theta_w = 3\pi/2$	$\theta_w = 2\pi + \theta_u$
$y_u = 0$	$\theta_w = \pi$	0	$\theta_w = 0$
$y_u < 0$	$\theta_w = \pi + \theta_u$	$\theta_w = \pi/2$	$\theta_w = \theta_u$

表 4. 最適補正角の相関性

	$\theta_c < -\pi$	$-\pi \leq \theta_c \leq \pi$	$\pi < \theta_c$
θ_c	$\theta_c = \theta_c + 2\pi$	θ_c	$\theta_c = \theta_c - 2\pi$

3) 走行速度および旋回速度からの移動角の算出

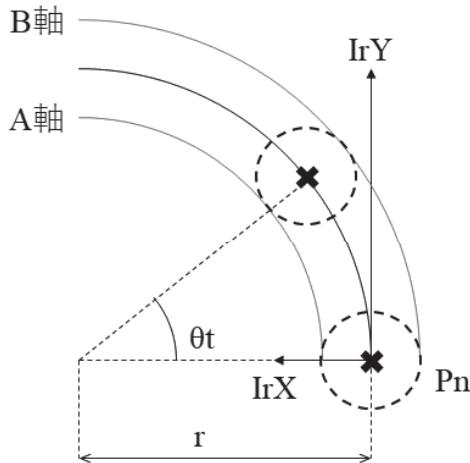


図 5. 旋回図

図 5 に搬送ロボットの旋回図を示す。評価試験の搬送ロボットは走行／旋回軸制御、かつ速度制御を行っており、走行速度指令 IrY (Y 軸速度/前進後進)、旋回速度指令 IrX (X 軸速度/旋回) の個別指令により動作する。進行方向に対し、左モータ制御を A 軸、右モータ制御を B 軸として、それぞれのモータ速度指令を IrA, IrB とする。速度および旋回指令の関係を式 (6) に示す。なお、IrY : 0 ~ 2000[rpm]、IrX : 0 ~ 1000[rpm] の範囲とする。

$$\begin{aligned} IrA &= IrY - IrX \\ IrB &= IrY + IrX \end{aligned} \quad \cdots \text{式 (6)}$$

A 軸走行距離を At [mm/sec]、B 軸走行距離を Bt [mm/sec] とし、表 5 に示す本機仕様より、At および Bt を式 (7) より算出する。モータ性能により、IrA, IrB の上限値は 2000[rpm] とする。

表 5. 搬送ロボット仕様

減速比	1 / 27
車輪外周	465 mm
車輪幅	632 mm

$$At [\text{mm/sec}] = IrA / 27 / 60 * 465 = IrA * 0.287$$

$$Bt [\text{mm/sec}] = IrB / 27 / 60 * 465 = IrB * 0.287$$

$$\cdots \text{式 (7)}$$

また、旋回角度を θ_t [rad/sec]、旋回円の中心を A 軸方向とする旋回半径 : r [mm]とした場合、At および Bt の関係は式 (8) となる。

$$\begin{aligned} At [\text{mm/sec}] &= 2\pi(r - 632/2) * (\theta_t / 2\pi) = (r - 316) * \theta_t \\ Bt [\text{mm/sec}] &= 2\pi(r + 632/2) * (\theta_t / 2\pi) = (r + 316) * \theta_t \end{aligned} \quad \cdots \text{式 (8)}$$

式 (7) および式 (8) より、 θ_t および r は式 (9) となる。また、 θ_t の変換式 t [deg/sec]を式 (10) に示す。

$$\begin{aligned} \theta_t [\text{rad/sec}] &= (Bt - At) / 632 = (IrB - IrA) * 0.287 / 632 \\ r [\text{mm}] &= 632 * Bt / (Bt - At) - 316 \end{aligned} \quad \cdots \text{式 (9)}$$

$$t [\text{deg/sec}] = \theta_t * 180 / \pi \quad \cdots \text{式 (10)}$$

前述の式 (5) および表 4 より算出した補正角 θ_c [rad] と、式 (9) の結果である旋回角度 θ_t [rad/sec] より、補正に必要な旋回出力時間 IrX_t [sec]が、式 (11) より求められる。

$$IrX_t [\text{sec}] = \theta_c / \theta_t \quad \cdots \text{式 (11)}$$

旋回速度指令 IrX により、旋回出力時間 IrX_t は変化する。

以上の算出演算プログラムを開発し、搬送ロボット実験機への実装を行い、実機検証を行った。

3 結果

本技術を搭載した搬送ロボットを図 6 に示す。また、自律運転の試験状況を図 7 に示す。搬送ロボットは、操作機による無線操作機能を有しており、WiFi 機能による速度などの各種設定、動作状況モニタリングおよび自律運転データの管理状況確認を行う。表 6 にルート情報を取得するティーチング運転時の走行条件、表 7 に自律運転の実証試験における各種条件を示す。

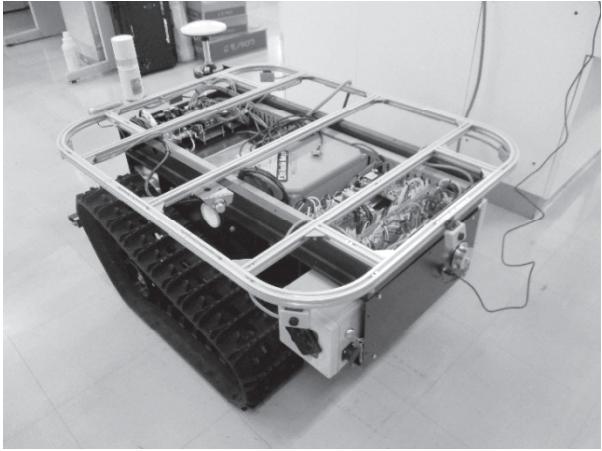


図6. 搬送ロボット実験機



図7. 実証実験の状況

表6. ティーチング運転時の走行条件

走行速度	1500rpm
旋回速度	500rpm
サンプリング	5sec

表7. 自律運転時の走行条件

走行速度	800rpm
旋回速度	500rpm
処理サンプリング	2sec
補正キャンセル角	3deg
測定用GPSサンプリング周期	1sec

表8. グラフ処理の中心座標

経度	E134.56092699
緯度	N34.04030958

※グラフデータは（測定GPS座標－中心座標）により算出

1) 定点ポイントへの追従試験

サンプリングのポイントを1データのみとし、様々な方向からの自律運転による追従試験を実施した。スタート地点から実際の走行ルートの軌跡をトレースした試験結果を図8に示す。グラフの中心が追従目標とする定点ポイントであり、各スタート地点より搬送ロボットは運転を開始する。その際の車体進行方向を、スタート地点にある矢印で示す。いずれのスタート地点および待機方向でも、目標とする定点ポイントに対し、最短となる旋回方向への補正を行いながら、目標の定点ポイントの到達許容範囲へ走行していることが確認できる。なお、表8にグラフ処理の中心座標を示す。

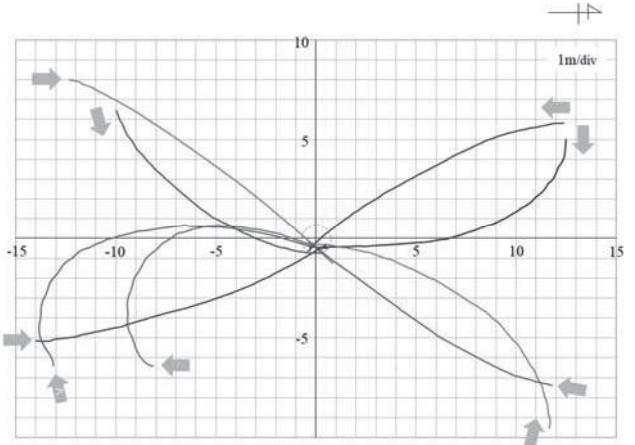


図8. 定点ポイント追従試験結果

2) 直線走行における追従試験

ティーチング走行において取得したポイント順に追従する自律走行試験の結果を図9に示す。4ルートの方位からの試験を行った。

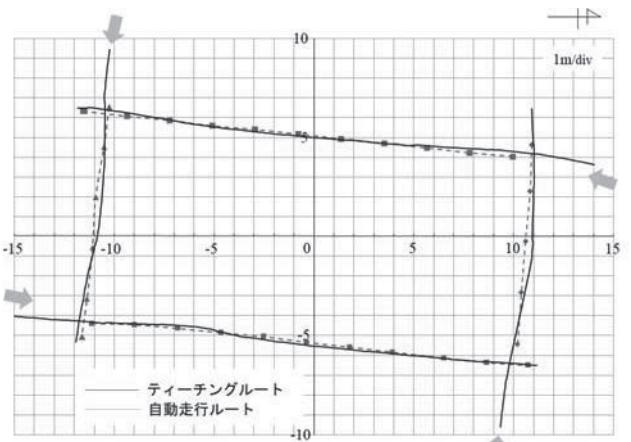


図9. 直線走行における追従試験結果

ティーチング走行と比較し、直線における自律運転走行では最大でもほぼ 0.5m 以内での誤差範囲内で走行していることが確認できた。また、最初のポイント手前から自律運転を開始した場合においても、最初のポイントへ追従走行を完了し、ティーチング走行のルート上を正確に走行できていることを確認した。

3) 旋回動作を含む追従走行試験

旋回動作を含む自律運転試験の結果を図 10 に示す。旋回動作付近において、ティーチングルートから 1m ほどの誤差範囲内に、膨らんで旋回していることが確認できた。本技術は自身の移動した結果から補正演算を行うため、GPS データの取得、プログラム演算サンプリング時間などのサンプリング演算処理の遅延が走行時のずれとして生じた結果である。それらのずれも直線動作に移行するごとに修正され、精度の高い走行を行うことが確認できた。

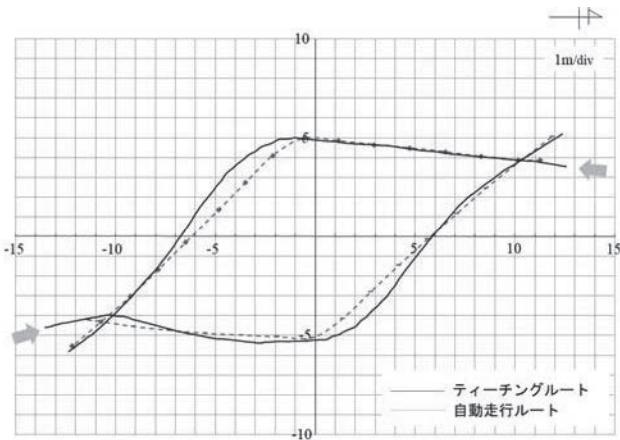


図 10. 旋回動作を含む追従走行試験結果

4 まとめ

PPP-RTK 方式の GPS データを用いた自律運転制御理論を考案し、プログラミング化を行い、搬送ロボットに実装しての検証を実施した。ティーチングで取得したルート座標に対し、極めて精度の高い追従走行を実証することが確認できた。旋回動作を含む走行では、ルート誤差が大きくなる傾向であるが、実際の使用において、旋回速度および走行速度の減速調整を行うなど、あらかじめ本技術の欠点を踏まえた使用方法を検討することで、精度補償の対策は可能であると考えられる。

本用途は屋外での使用を目的として開発を行った。GPS データは検知している衛星数により、位置座標の精度が影響を受けやすいため、高層の建屋周辺などの走行状況によって、本技術が適応できない可能性が考えられる。その対策および併用技術として、カメラ画像を用いた誘導システムの開発を実施しており、今後これらの技術を複合した自律走行支援システムの完成を目指して開発を進めていく予定である。