

自律移動ロボットによる 盛土締固め度及び水分量測定の自動化

神 山 和 人・妻 木 俊 道・千 葉 力

本稿では、建設作業のロボットによる代替のひとつとして、自律移動ロボットを用いた RI (Radio Isotope) 計器による盛土の品質管理の自動化について報告する。RI 計器を搭載した台車を自律移動ロボットがけん引し測定を行うことで盛土品質管理のための試験を自動化した。ロボットは複数のセンサ情報から自己位置推定を行い、目標地点を目指して移動する。現場での実証実験の結果、人手による作業と同等の測定結果が得られた。

キーワード：ロボット，自律移動ロボット，盛土品質管理，ROS (Robot Operating System)，RI 試験

1. はじめに

高度成長期に建設されたインフラの維持管理など今後も建設業における需要は一定数あり続けられると思われる。しかし、我が国における労働人口の将来推移は減少の一途を辿り、2015 年に約 7,700 万人いる生産年齢人口は 2060 年には約 4,400 万人にまで減少する見通しとなっている。建設業における技能労働者数に絞ってみると 2014 年に 341 万人居た労働者は 2025 年には 216 万人にまで減少するとされている¹⁾。それに対し、建設投資額の推移に関してはほぼ横ばいとなっており、大幅な人手不足が懸念され、新規労働者の確保が喫緊の課題となっている。

労働者不足の課題に対し、新規労働者の確保のみだけでなく、建設生産の効率化も同時に図っていかねばならない。建設材料や新工法等様々な研究がなされており、その一つにロボットによる建設作業の自動化が挙げられる。建設作業のロボットによる自動化は、その複雑さゆえ現在でも非常に困難ではあるが、一部の作業に関しての自動化の研究は多数行われている。資材運搬用ロボット²⁾、墨出しロボット³⁾、コンクリート仕上げロボット⁴⁾や、広義には溶接作業の半自動化⁵⁾や BIM (Building Information Modeling) による作業支援なども今後ロボットによる自動化を支える技術となっていくと考えられる。

本稿では、建設作業のロボットによる代替のひとつとして、自律移動ロボットを用いた RI (Radio Isotope) 計器による盛土の品質管理の自動化について報告する。

2. RI 計器を用いた盛土の品質管理手順

RI 計器を用いた盛土の品質管理は施工した盛土に対し複数地点に計器を設置し、その締固め度、水分量を測定するものである。測定地点の選定は国交省の定めた管理要領に記されており、以下となっている⁶⁾。

- ①盛土を管理する単位（以下「管理単位」）に分割して管理単位毎に管理を行うものとする。
- ②管理単位は築堤、路体、路床とも一日の一層当たりの施工面積を基準とする。管理単位の面積は 1,500 m² を標準とする。また、一日の施工面積が 2,000 m² 以上の場合、その施工面積を 2 管理単位以上に分割するものとする。
- ③各管理単位について原則 15 個のデータ採取を行い、平均してその管理単位の代表値とする。ただし、一日の施工面積が 500 m² 未満であった場合、データの採取数は最低 5 点を確保するものとする。
- ④データ採取はすべて施工当日に行うことを原則とする。
- ⑤一日の施工が複数層に及ぶ場合でも 1 管理単位を複数層にまたがらせることはしないものとする。
- ⑥土取り場の状況や土質状況が変わる場合には、新規の管理単位として取り扱うものとする。

RI 計器の写真を写真—1 に、測定フローを図—1 に示す。写真—1 にある計器は重量約 10.5 kg 及び線源棒 2 kg となっており、試験時に線源棒は取り付けられる。測定フローは機材の準備から始まり、線源以外からの線量を計測する標準体 BG (Back Ground) 測定後、線源を取り付け標準状態で計測しキャリブ

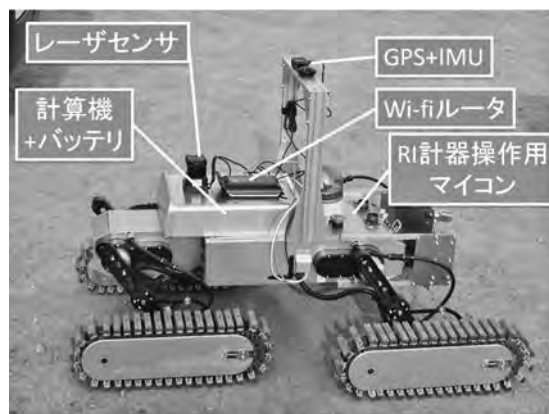
写真-1 RI 密度水分計「ANDES」⁷⁾

図-2 マルチクローラ型移動ロボット

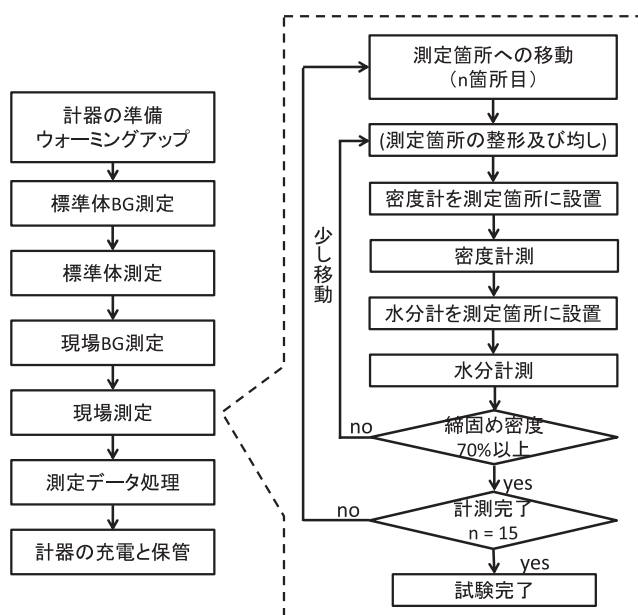


図-1 RI 計器による測定フロー

レーションを行う。その後、現地での線源以外からの線量を計測し(現場 BG 測定), 現場測定へ移る。今回、自動化を進めるのはこの現場測定の部分である。図-1 右側にその詳細なフローを示す。測定箇所 1 点につき、データ収集は 1 回/秒で 1 分間行われ、その平均値が記録される。また、表面不陸による測定不良を除くため締固め密度 70% 未満のデータは取り除く。計測地点を変更しながらこの作業を標準で 15 回繰り返し試験終了となる。

3. 自律移動ロボット及び計測器搭載台車

(1) マルチクローラ型移動ロボット

本研究で用いる自律移動ロボットのハードウェアは宇宙航空研究開発機構が開発した“健気”と呼ばれているクローラ型ロボットで、図-2 にその全景を示す⁸⁾。4 つのクローラ及び 8 つの受動機構リンクを生

かし、約 450 mm の垂直段差を乗り越え、約 45 deg の斜面を踏破する性能を持つため、不整地の多い建設現場での適用が可能と考え選定した。

本ロボットに RI 計器が搭載された台車をけん引させ、複数点ある測定箇所を順に巡らせることで試験の自動化を図る。そのためには、ロボットがどこにいるのか、どの方角を向いているのか、という自己位置推定及び、目的地へ到達するための経路生成、障害物があった際の回避行動などのソフトウェアが必要となる。本研究では、自己位置推定は GPS 及び慣性計測装置 IMU (Inertial Measurement Unit) の情報を用いて行い、障害物回避はレーザセンサ LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) の情報を用いて行う。

(2) 計測器搭載台車

図-3 にマルチクローラ型移動ロボットとそれに接続された計測器搭載台車の上面及び側面図を示す。台車には RI 試験を行う計器が搭載されており、台車内部に配置されたマイコンから信号を送ることで計器を昇降させることが可能になっている。また、移動ロボットが稼働するために必要な充電電池も台車内に配置している。台車はリンクにより移動ロボットと接続さ

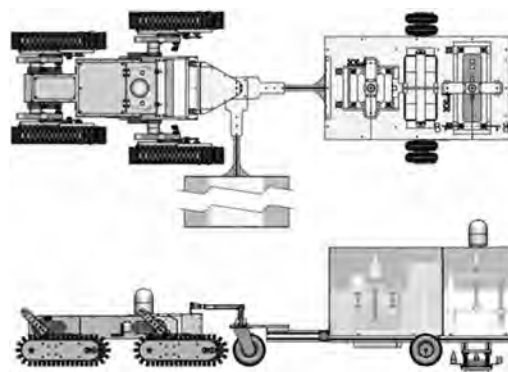


図-3 計測器搭載台車の上面及び側面図



写真—2 移動ロボット及び計測器搭載台車

れており、移動ロボットの動きに追従するようになっている。写真—2にハードウェア全景を示す。

4. ロボットの自律移動化

ロボットの自律移動化には前述のように自己位置推定、経路生成、障害物回避といった多岐にわたるプログラム開発が必要となる。短期での建設現場への適用可能性を探るため、本研究におけるロボット制御にはROS (Robot Operating System) を用いた⁹⁾。

ROSでは機能毎にプログラムがパッケージ化されており、パッケージを組み合わせることで短期に必要なシステム開発が行えるようになっている。本研究ではRobot Localization package 及び Navigation stack と呼ばれるパッケージを組み合わせ、制御システムの開発を行った。制御プログラムの機能の組み合わせと情報の流れをブロックダイアグラムで表したものが図—4となる。

図—4左端にあるGPS及びIMUから出てくる情報をRobot Localization packageで受け、自己位置推定を行う。得られた自己位置情報はNavigation stackの一部であるLocal plannerに入力される。Navigation stackでは経路生成が行われるが、大きくGlobal plannerとLocal plannerに分けられ、大域的な経路生成と局

所的な経路生成が行われる。大域的な経路生成は主としてゴール地点を入力とする。局所的な経路生成では、推定された自己位置からロボットが予測した位置との差分を計算し、経路に修正を加える。その後、次のタイミングでの速度指令値を出力する。

一方で、図—4右端にあるLiDARからの情報及び事前に指定したMapからの情報を入力として障害情報であるCostmapが作成される。これは移動コストを計算するものである。LiDARからの情報はLocal costmapに反映され、その情報を基にLocal plannerは経路生成を行う。移動経路に障害物があった場合、その場所の移動コストが高くなるため、別の経路へ変更される。

制御プログラムの出力値である速度指令値はモータドライバへと送られ、モータが駆動される。

5. RI 試験の自動化実証実験

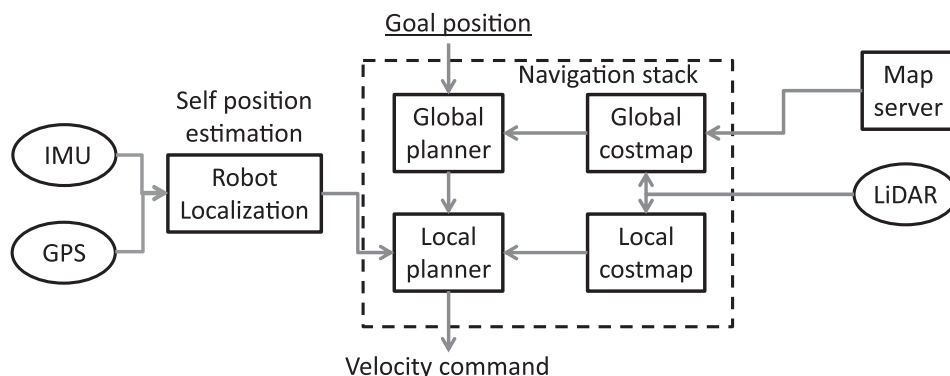
(1) ロボットによる試験フロー

前述のRI計器を用いた盛土の測定フローに基づき、ロボットを用いた測定は以下の流れで行う。

- ① 15点分の測定点のGPS座標値を事前に計測し記録しておく
- ② 移動ロボットに搭載した計算機に測定点を入力
- ③ 移動ロボットが計測器搭載台車を引き、測定点まで移動
- ④ 到着後、計器を降ろし地面に密着させ測定を行う
- ⑤ 測定終了後、計器を上げ、次の測定点へ移動→④に戻り繰り返す

(2) 現場でのRI試験自動化実証実験・評価

5.1にあるロボットによる試験フローに基づきRI試験の自動化実証実験を行った。実験は約30m×200mの長方形エリアを対象とし、約10m間隔で15点の測定点を設定した。測定点を中心とした半径2m



図—4 制御プログラムのブロックダイアグラム



写真一3 RI試験自動化実証実験の様子

表一1 締固め密度・含水比計測結果の比較

試験方法	自動 RI 試験	従来試験	差
締固め密度 ρ_t (g/cm ³)	2.192	2.242	0.05
含水比 w (%)	7.0	6.9	-0.1

の円内に移動ロボット本体が入った時点で搭載されている計算機は到着したと認識し、測定を開始する。計器を地面に密着させた後、1分以上測定を行い、終了後計器を戻し、次の測定点への移動を開始する。写真一3に実験中の様子を示す。写真一3中左下に白線で×印が描かれており、この印の位置が予め指定した測定点を表している。また、台車後方の下部から測定器が降ろされ地面に接地されている。

表一1にRI試験の結果得られた盛土の締固め密度及び含水比を示す。データは15回分の測定結果の平均を示しており、どちらの測定結果も自動RI試験と従来試験で大きな差は無く、測定誤差である測定値に対して約2%の程度となっている。実証実験の結果、移動ロボットを自律移動させ、RI試験を自動化することが可能であることが分かった。

6. おわりに

本研究では盛土の品質管理自動化を目的とし、RI計器を搭載した台車を自律移動ロボットがけん引し測定を行うものである。今回はROSを利用したロボッ

トの自律移動制御ソフトウェアに関して詳細を述べ、また実験の結果概ね想定通りに測定点移動が行えることを示した。今後はより高い精度で移動可能とすると共に、盛土の品質管理以外の作業の自動化に応用していく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 中央建設業審議会・社会資本整備審議会産業分科会建設部門 第13回基本問題小委員会 参考資料 <http://www.mlit.go.jp/common/001121700.pdf>
- 2) 大本絵利, 土井暁, 金子智弥, “低床式 AGV の開発 —新築工事における資材搬送の省力化—,” 第16回建設ロボットシンポジウム, P2-9, 2016.
- 3) 大本絵利, 井上文宏, 土井暁, “自走式墨出しロボットシステム,” 大林組技術研究所報 大林組技術研究所 編 (76), 1-7, 2016.
- 4) 中村洋祐, “コンクリート床仕上げロボットの開発,” 第16回建設ロボットシンポジウム, O3-2, 2016.
- 5) 大成建設株式会社プレスリリース, T-iROBO Welding, http://www.taisei.co.jp/about_us/release/2016/1439223854872.html
- 6) 国交省・RI計器を用いた盛土の締固め管理要領(案), http://www.qsr.mlit.go.jp/s_top/doboku/hikkei-kanri12.pdf
- 7) ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社, <http://www.soilandrock.co.jp/products1/andes>
- 8) 妻木俊道, 本田瑛彦, 加藤裕基, 藤岡紘, “4クローラ型不整地踏破ロボットの開発,” 日本ロボット学会誌, vol. 34, No.7, pp.422-431, 2016.
- 9) ROS (Robot Operating System), <http://wiki.ros.org/>

【筆者紹介】



神山 和人 (かみやま かずと)
 ㈱竹中工務店 技術研究所
 新生産システム部門 ロボティクスグループ
 研究主任



妻木 俊道 (つまき としみち)
 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
 研究開発部門第二研究ユニット (ロボティクス)
 主任研究員



千葉 力 (ちば つとむ)
 ㈱竹中土木
 技術・生産本部 技術開発部