

# 遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの開発

古 屋 弘 山 田 祐 樹 栗 生 暢 雄  
(本社機械部)

清 酒 芳 夫 森 直 樹  
(本社機械部)

## Development of Remote-Controlled Robot for Disaster Investigation

Hiroshi Furuya Yuki Yamada Nobuo Kuriu  
Yoshio Seishu Noaki Mori

### Abstract

Robotization in the construction industry is developed for the survey or investigation of infrastructure and as a substitute for dangerous work; it has recently been put into practical use. The authors have been developing a ground exploration robot for the initial investigation in the landslide disaster site. This robot has a high traveling performance using both the six-axis binocular camera unit (TORSO), which is a 3D remote-controlled system, and high traveling performance of the multicrawler. Moreover, the robot has a function to be able to obtain the information by remote controlled sounding of the ground in stricken areas where it is difficult for humans to enter especially after the event of a dangerous disaster. Development was on the way, but it was possible to acquire a fixed outcome, and hence, an outline is introduced in this study.

### 概 要

建設分野でのロボット化は、危険作業の代替や調査点検などを目的として開発され、近年実用化されている。筆者らはこれらのロボットの一つとして、土砂災害現場での初動調査に活用可能な地盤探査ロボットを開発中である。このロボットは、土砂災害発生後の災害地の状況を探査することを想定し、6軸両眼カメラヘッドロボット(TORSO)による遠隔操縦やマルチクローラによる高い走破性を組み合わせ、災害直後の人間が立ち入ることが困難な災害地の地盤のサウンディングを遠隔で行える機能を有するものである。本報文では開発途上ではあるが一定の成果を得ることができたので、この概要を紹介する。

## 1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化に対する調査点検の重要性が再認識され、新しい調査点検手法が幾つか提案されている。その技術の一つとしてロボット化があり、遠隔操縦または自律式のマルチコプター(以下、DRONE)の活用などを筆頭に技術の進歩はめざましいものがある。また、従来からの「無人化施工」も遠隔操作関連技術の高度化からニーズがさらに高まりつつある。この無人化施工は災害が多発する日本で独自に発展した技術であり、年々機能や操作性も進歩し、数多くの現場で利用されてきているが、これらは「建設ロボット」の代表的なものである。

建設分野でのロボット開発の目的は、調査点検など高齢化や減少が進む技能工の代替と、災害復旧に代表される危険作業の代替に大別できるが<sup>1)</sup>、筆者らは後者のロボットの一つとして、災害現場での初動調査に活用可能な地盤探査ロボットを2014年からNEDOの開発助成を受け開発を開始した。近年豪雨等による激甚災害が増えつつある日本で、土砂災害に対する災害対応ロボットとして開発を行っているものであり、災害状況の把握のうち土砂の堆積状況や重機の乗り込みが可能か否かの地盤強

度を直接的に調査することを目標とした。以下このロボットの概要を紹介する。

## 2. 建設ロボット開発の背景とニーズ

建設分野におけるロボット化は、「無人化施工技術」として発展し、今日さまざまな現場で活躍するに至っている<sup>2),3)</sup>。建設分野におけるロボット化の必要性はFig. 1にまとめるが、特に近年は地震、豪雨、噴火災害など大規模災害が各地で発生し、それに対する対策に無人化施工が数多く適用されている。近年、我が国は不幸なことに、Table 1に示すような数多くの自然災害にさらされ(1993年から2016年4月まで記載)、多くの被害を受けている。これらの災害復旧や社会インフラの再構築に無人化施工技術は大いに活躍している。

建設分野におけるロボット化のニーズは、①社会インフラの老朽化の進行、②地震・風水害等の災害への備え、③人口減少・少子高齢化が主因であり、ロボット化によって、社会インフラの維持管理の合理化、および災害対応の効果・効率を格段に高めることが期待されている。

しかし、建設ロボットは工場などで用いられる産業用ロボットと異なり、屋外での利用が前提となる。このた

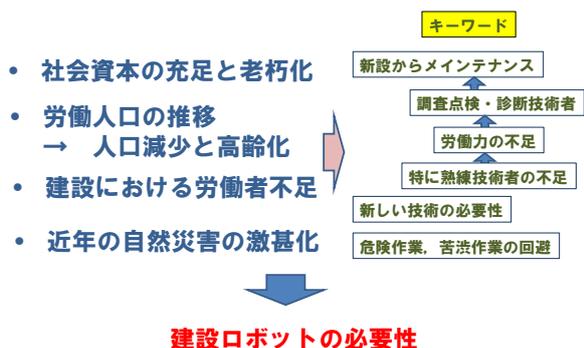


Fig. 1 建設分野でのロボットのニーズ  
The Needs for Robotic in the Construction Field

Table 1 大規模災害と建設分野のトピックス  
(1993～2016年)  
Large-Scale Disasters in Recent Years (1993-2016)

年	大規模災害
1993	北海道南西沖地震 (7月) 平成5年8月豪雨 (鹿児島県) (8月)
1994	北海道東方沖地震 (10月) 三陸はるか沖地震 (12月)
1995	兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) (1月)
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害
1998	高知豪雨 (9月)
1999	6.29豪雨災害 (福岡・中国地方) (6月)
2000	有珠山噴火 (3月～) 三宅島噴火: 全島避難 (7月～) 東海豪雨 (9月) 鳥取県西部地震 (10月)
2003	宮城県北部地震 (7月) 十勝沖地震 (9月)
2004	新潟・福島豪雨/福井豪雨 (7月) 新潟県中越地震 (10月)
2006	平成18年豪雪 (日本海側) 平成18年7月豪雨 (九州・中部) (7月)
2007	能登半島地震 (3月) 新潟県中越沖地震 (7月) 福岡県西方沖地震 (9月)
2008	岩手・宮城内陸地震 (6月) 平成20年8月末豪雨 (紀伊半島から関東) (8月)
2009	平成21年7月中国・九州北部豪雨 (7月)
2010	西日本豪雨災害
2011	東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) (3月) 紀伊半島豪雨災害 (9月)
2012	平成24年梅雨前線豪雨 (九州から近畿) (7月) 三陸沖地震(12月) 平成24年豪雪(11月～平成25年3月)
2013	平成25年台風26号 (大島土石流) (10月)
2014	伊豆大島近海地震(5月) 平成26年8月豪雨による広島市の土砂災害(8月) 御嶽山噴火(9月)
2015	箱根山で火山活動が活発化(5月) 鬼怒川の氾濫(9月)
2016	平成28年 (2016年) 熊本地震(4月)

め以下のようなロボット開発における課題があった。

- 1) 利用環境は毎回異なり、現地での自然環境を受け入れ、劣悪な条件下での作業
- 2) 使用頻度も一般的には低いことから、開発および導入費用の問題
- 3) 現在の建設ロボットは遠隔操縦が基本であり、遠隔操縦における情報伝達の遅延による施工効率の低下
- 4) モニタなどを利用した遠隔操縦の訓練の必要性

5) 屋外の無線LANにおける伝送容量・速度の制約  
特に上記5)に関わる、遠隔操縦における情報伝達の遅延は、作業効率の低下のみならずオペレータの違和感や機械制御の遅れによるトラブルの原因にもなるため、建設分野でのロボット化の重要な開発ポイントである。

### 3. 災害対応型ロボット開発のねらい

筆者らは、災害対応の建設システムの一つとして無人化施工が再注目される中で、無人化施工における効率低下の抑止を目指した操作性向上などの幾つかの課題解決のために、2011年から最新の無線通信技術、3Dおよび体感型操作環境(簡易バーチャルリアリティ)の活用による「次世代無人化施工技術」を開発し、その効果に関する検証実験を2012年に行った<sup>4)</sup>。車両搭載と俯瞰カメラを用いる従来型の遠隔操作では、オペレータが実際に乗車して作業を行う重機作業の40～65%程度の作業効率であるのに対し、2011年に開発を行った3D体感型遠隔操縦システムでは65～95%の効率となり、従来の遠隔操作型の重機操作に対して30%以上の効率アップを実現できる事を確認した。一方で、ステレオ画像等の利用による高速通信では実運用に当たって、現場での無線の混信や周波数の取合い等の問題も起こりうる事が明らかにした。

これらの無人化施工の開発成果に基づき、筆者らは災害対応ロボットへの開発を実施することとし、2014年度のNEDOの開発助成を受け、土砂災害を想定した地盤探査ロボットの開発に着手した。このロボットは、災害地の初動探査に活用することを想定したもので、以下の条件を克服し作業を行うことを目標とした。

- 1) 安全な場所からの探査: 操縦地点と災害調査地点の間の2kmの往復を可能とする
- 2) 泥濘地(軟弱な地盤)での走破性能の確保(コーン指数200kN/m<sup>2</sup>での走破性の確保)
- 3) 登坂能力: 傾斜30度、段差50cmを走破
- 4) 災害発生直後のぜい弱な通信インフラにも対応: 災害発生地で有人での俯瞰カメラ等の設置を行わなくても良いように、俯瞰画像は用いずロボットに搭載した疑似3次元映像 TORSOシステム<sup>5),6)</sup>の画像のみで操縦する
- 5) 遠隔地からの地盤探査: 表層3mまでのスウェーデン式サウンディングと間隙水圧測定による地盤探査性能

これらの機能をシステム化しロボットの開発に着手した。ロボットの概要をFig. 2およびPhoto 1に、ロボットに搭載した機能をTable 2に示す。

### 4. 無人調査ロボット製作における仕様検討

災害地の調査は、近年ではDRONEによる状況調査や、それにより取得した画像データから地表モデル(点群データなどを利用)を作成し地形情報を取得することも一

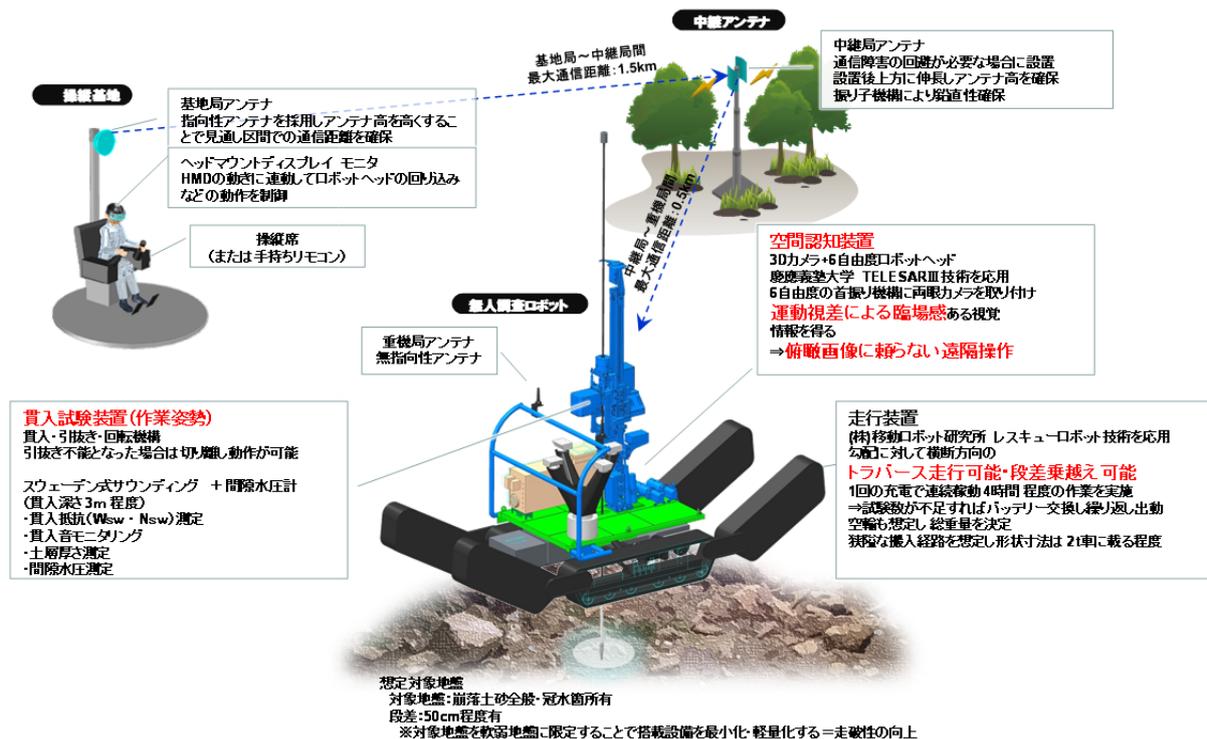


Fig. 2 マルチクローラ型遠隔操縦無人調査ロボットの概要

Overview of Multi-Crawler-Type Unmanned Ground Research Robot by Remote Boarding Operation



Photo 1 マルチクローラ型遠隔操縦無人調査ロボットの主要機構

The Main Equipment of the Multi-Crawler-Type Unmanned Ground Research Robot

一般的になってきた。しかし、今回開発したロボットは災害地の物性調査の一つとして、原位置のサウンディングを行う事を目標とし、陸路からアクセスすることとして開発目標項目を定めた。

目標の設定においては実際の土砂崩落災害地を模して実施することとし、当社が実際に災害復旧を行った平成23年台風12号による和歌山県日置川流域熊野地区の実績を参考とした。本災害は、台風12号により総雨

Table 2 開発したロボットの諸元  
Specifications of the  
Unmanned Ground Research Robot

外径寸法	全長 4340mm 全高 1740mm (走行時) 全幅 1650mm
質量	1900kg
走行性能	乗り越え可能段差 50cm トラフィカビリティー: 軟弱地盤コーン指数 200kN/m <sup>2</sup> 登坂可能傾斜 30°
走行装置	メインローラ×2+サブローラ×4
貫入装置	スウェーデン式サウンディング試験機 (遠隔操作)
画像取得装置	3D (1,080 × 1,200 片眼最大) 前後 2D 全方位カメラ (2,592 × 1,944 最大)
モニタリング装置	HMD (2,160 × 1,200 最大)
情報提示	3D 映像, 前後 2D, 全方位映像, 貫入点近景映像, HMD 内走行ルート, 目標地点, ロボット傾斜角, クローラー状況
ロボット走行支援	2 周波 GNSS による位置確認
取得データ	貫入深度, 貫入抵抗 (換算 N 値), 貫入音, 貫入点近景画像, 間隙水圧
無線通信方式	2.4GHz 無線 LAN (今後変更も検討中), 通信距離 2km (中継あり)
無線中継装置	遠隔操作によるアンテナ伸長 GL+4m 振り子機構による自動天頂機能 パッチアンテナ搭載
無線基地局	アンテナ伸長 GL+10m 高利得パッチアンテナ搭載
その他	事前情報に基づく調査シミュレーション (ソフトウェア)

量1,300mmを超える豪雨に見舞われ、約410万m<sup>3</sup>の深層崩壊が発生し、崩壊斜面直下では堆積土により河道が閉塞され湛水池が形成されたもので、現地での被災状況をPhoto 2およびPhoto 3に示す。Photo 2から深層崩壊した土砂は崩壊地からおおよそ2km下流まで流出していることが解る。同時期に発生した他の深層崩壊地を確認しても1km~3km程度であり、これらのデータから災害発生規模を2kmと想定することとした。

災害発生地点では、沢筋に沿って流された土砂は上流に行くほど礫が大きくなり、Photo 3に示すように粒径50cm~80cmの礫が存在する。ある程度の回避を前提とし、高さ50cm程度の段差や障害物の乗り越えが可能であれば目標地点への到達が可能であると判断した。また、現地では水流と共に土砂の細粒分が流出し、堆積する場所では人が歩けないくらい軟弱な状態となっていた。人が歩けない状態、建機が走行できない状態の目安がコーン指数200kN/m<sup>2</sup>未満とされるため、コーン指数200kN/m<sup>2</sup>未満の軟弱地盤の走行が可能であることも目標とした。さらに、堆積土砂の一般的な安息角が30°程度であることから、地盤がスリップしない条件下で30°の登坂能力の確保を目標とした。

運用面の目標としては、狭隘な林道等でも搬入が可能となるよう2t車に積載可能な外形寸法及び重量とし、現地到着後2時間程度の短時間で立上げが可能であることとした。

## 5. ロボットに適用した要素技術

ロボットの製作において、設定した目標項目に対し、走行装置、試験装置、画像取得装置、無線通信装置の要素毎に開発することとした。ここでは、要素別に実施した開発内容と各要素を技術統合したインターフェースの開発内容、これらの成果を検証した実証試験結果について

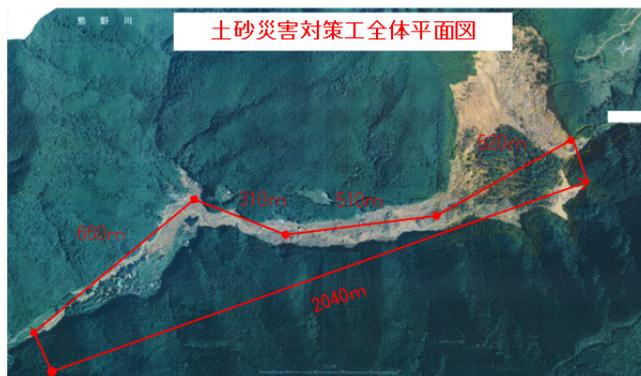


Photo 2 災害現場(平面図)  
Disaster Area Plan View



Photo 3 土砂災害現場の土砂(岩石)流出状況  
Outflow of the Disaster Areas of Driftwood and Gravel

て以下に示す。

### 5.1 走行装置の開発

本開発では、レスキューロボット技術として実績のある「マルチクローラ型走行装置」((株)移動ロボット研究所製)の技術を応用して開発することとした。これはメインローラに前後サブローラを追備したもので、今回の仕様に合わせスケールアップし、試作機を製作し要素試験を実施した。災害対応ロボットでは内燃機関の動力をそのままコントロールすることは、細かな圧力制御等を伴うなど制御性の面から現状では避ける傾向がある。また、排出ガスが閉鎖空間で滞留しやすい災害地では使用することを避けることが望まれる点と、排気音やエンジンノイズは周囲の音声の集音を妨げるためである。一方電動機は高出力のものが少ないこと、バッテリー駆動では稼働時間の制約が大きいなどの欠点がある。しかし、近年、電動輸送機器(Electric Vehicle; EV)の出現により高出力モータが市販されとともに、大容量で比較的軽量なりチウムイオンバッテリーの入手が可能となったことから駆動はモータとした。

クローラの選定に当たっては、全装備重量2t以下を目標としたことから、重量の比較的軽いゴム製クローラとした。また、トラバース走行時に受けるねじり応力に耐えるため芯金入りとした。接地面のパターンは泥濘地での走行、トラバース走行時の耐横滑り特性を考慮し選定した。

走行装置の仕様の選定を進めるとともに、調査ロボッ

ト全体の接地圧および転倒角の検討も行った。これは、段差乗り越え性能や登坂力を増強するために駆動力やサブローラの起倒力(地面に対し押しつける方向の力)を高めると、走破装置の重量増に繋がり接地圧は増加する。また、搭載する貫入試験装置は反力を必要とするが、それも接地圧とトレードオフの関係にある。さらに、試験装置の重量増は重心が高くなり転倒角が増加してしまうというすべてを解決するための検討を行い、走行装置のモデル実験等を経て仕様を決定した。走行系が完成した状況をPhoto 4に示す。

## 5.2 貫入試験装置の開発

土砂崩落災害において、重機を使用する復旧作業を開始するためには、崩落土砂の地盤性状を迅速かつ正確に収集し、人間及び機械を現場に投入可能かどうかの安全性を定量的に検討することが重要である。しかし、現状では初動段階での情報収集は上空から、ないし崩落箇所から離れた安全な場所からの画像情報及び測量情報に限られ、崩落地盤そのものの性状は得られていない。

本開発では、前述の通り陸路からアクセスすることにより、崩落地盤そのものの性状を得ることを目的として、災害地の地盤性状を把握するためのサウンディング方法を選定した。一般的にはコーンと呼ばれる貫入棒を地盤に圧入し、その抵抗を測ることで地盤の強度を調べるが、貫入には反力が必要となる。反力は自重であるが、2t以下の調査ロボットを目標としたことから、あまり貫入力を要せずに所定のデータの得られる方法を選定することとし、住宅の地耐力調査などで用いられているスウェーデン式サウンディングによる試験方法を採用することとした。

スウェーデン式サウンディングはJIS規格に基づく試験で蓄積データが豊富であること、既に半自動の製品が存在したことが選定理由である。また、小口径かつ回転機構で貫入するため反力が小さくすみ、貫入力は静的(錘による自沈)であるため信頼性が高く複雑な機構が不要である点も有利である。

取得できるデータは、静的貫入抵抗の $W_{sw}$ と $N_{sw}$ で、その値から換算N値を算出し、そのN値から内部摩擦角、粘着力、一軸圧縮強さが換算値として求められる。また、一般的なスウェーデン式サウンディングにおいては、オペレータが貫入ロッドから発する音によって土質を判定しているが、今回はロッド周辺音を採取し操作場所で判定できるようにすることとした。さらに、一般のスウェーデン式サウンディング試験機では間隙水圧の測定は不可であるが、ロッドの先端部に間隙水圧計を埋込込むことで、間接的ではあるが地下水位の計測も可能とした。

試験可能深度は、できる限り深い方が望ましいが、一般的なサウンディングでは貫入ロッドの接続をオペレータが行っており、これを実現するには遠隔操作する場合はロッドチェンジャー等が必要となる。一方でロッドチェンジャーを搭載することは重量増につながり、走行性



Photo 4 開発したロボットの走行装置  
Robot Travel System (Multi-Crawler System)



Photo 5 ロボットに搭載する貫入試験装置  
Intrusion Device  
(State in Which the Reader Has Standing)

能、特に軟弱地盤における走破性に影響する。そこで、今回はロッドは継ぎ足すことは行わず予め貫入深さ分のロッドを装着した状態で走行することとした。ロッドの長さは走行時の機体全長の4mまで搭載は可能であるが、運搬時に立木等との接触リスク等を勘案して、ロッド長(貫入深度)を3mとした。

なお、今回はロッドとそれを保持する貫入機構を伴うリーダー自体を可倒式とする方法を採用することとした。このリーダー起倒機構によって、試験地でベース部の鉛直が確保できない場合にも起倒装置によって角度調整することにより、常に鉛直方向にロッドを貫入することを可能とした。貫入装置をPhoto 5に示す。

## 5.3 画像取得装置の開発

従来の応急復旧段階での無人化施工では俯瞰画像が必須とされているが、俯瞰カメラの設置は有人作業によるため危険を伴うことが課題となっていた。このため、今回はテレグジスタンス技術を応用したTORSOシステム(3Dカメラ+6自由度ロボットヘッド(慶應義塾大学製))<sup>7)</sup>を改良し、俯瞰画像を用いずヘッドマウントディスプレイ(以下HMDとする)上の映像のみで障害物の回



Photo 6 操縦用ヘッドマウントディスプレイ装着状況  
Situation of the Maneuver Wearing the HMD

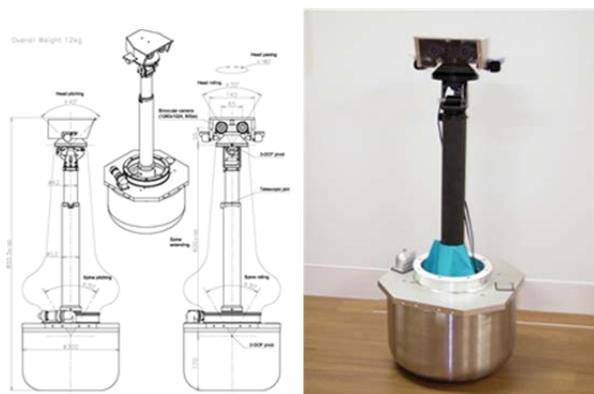


Fig. 3 屋外用TORSOの外観  
Outdoor Field Specification TORSO Robot



Photo 7 遠隔操縦の状況(操縦席)  
The Appearance of the Steering Cockpit

避や乗り越えといった走行の遠隔操作が可能となるよう画像取得部分の開発を行った。なお、TORSOシステムによる3D画像のみでなく、状況に応じて2D全方位画像も併用することで、いわゆる3D酔いのリスク低減を図ることとした。

トレイグジスタンスとは、操縦者の身体運動と全く同期した運動を行なうロボットの頭部に人間の左右眼と同等のステレオカメラを配置し、操縦者にHMDを装着して

ステレオカメラの映像を投影することによって、操縦者が自在に身体を動かした際に、ロボットがあたかも操縦者の「分身」のように動き周囲の映像を操縦者にフィードバック、操縦者が遠隔地からロボットに乗り移ったかのような感覚を得ることができる技術の総称である(Photo 6参照)。本開発項目においては、このトレイグジスタンス技術を今回開発した調査ロボットの遠隔操縦に用いることで、操縦者が安全な地点にしながら無線を通じてまるで重機に搭乗しているかのような感覚で操縦することができる災害調査ロボットシステムの開発を目指した。既存のシステムは屋内での使用を想定しており、災害現場での利用に耐えうるだけの耐久性・防塵性・防水性を有していない。そこでFig. 3に示すように、耐振動・防塵性・防水性を向上した屋外現場仕様のトレイグジスタンス画像取得装置を新規に開発した。

災害現場を想定して新たに開発したTORSOシステムにおいては、カメラは30fpsのフレームレートで画像を取得していたが、これでは操縦者がHMDを装着することで、視界が奥行きのある映像に覆われ、車酔いのような症状を引き起こす所謂VR酔いの影響を受けやすいことから、非球面レンズを用いた試作などを進め、13メガピクセルのカメラモジュール(See3CAM\_CU130)を用いた新たな撮像・提示系を構築した。現在ロボットに搭載しているカメラは1個35gと軽量であり、ステレオカメラとして2つ用いても80g以内で構成できる。左右眼は人間と同様に64mm離して配置し、搭載したボードPC(Intel NUC D54250WYB)により画像の圧縮と伝送を行った。ホードPCと新型TROSOロボットの制御系は2本のRS485規格で接続し、頭部角度・出力トルク等のデータの制御を行っている。最終的に各眼720p・60fpsの解像度で伝送され画像の各フレームはH264規格で圧縮され、UDP通信により伝送される仕様とした。

これらの技術により構成された操縦システム(コックピット)をPhoto 7に示す。

#### 5.4 無線通信装置の開発

無線通信は距離や障害物等を想定して、Fig. 4に示すように基地局、中継局、移動局の3つから構成することとした。

基地局は定置式とし、通信距離を最大限確保するため、全通信距離2kmのうち1.5km通信することを目標とした。中継局は、運搬する装置上に搭載することでそれ自身が移動可能とし、基地局および移動局との通信を常時確保するために追従機能を持たせることとした。中継局から移動局の通信距離は残りの500mとなり、移動局は散在する岩塊や樹木等を乗り越える為に絶えずアンテナ方向が変わることから、安定的に無線通信ができるよう全方位無指向性のアンテナを採用した。

今回のロボットでは、無線通信する信号は「制御信号」と「映像信号」に大別される。制御信号は、伝送量こそ少ないが確実性が求められ、映像信号は伝送量大きい

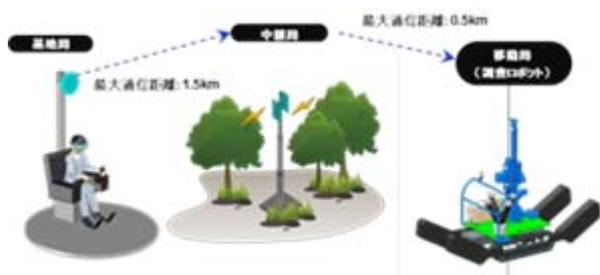


Fig. 4 遠隔操縦の概念図  
Wireless Communication Device Schematic View



Photo 8 基地局の無線アンテナ  
The Appearance of Radio Base Station



Photo 9 中継局  
The Appearance of Radio Relay Station

ことが特徴である。制御信号と映像信号を完全に独立させる手法もあるが、今回はシステムが簡略化できることから、同一の無線通信装置にて通信することとした。制御信号の確実性を担保するために、万が一通信が遮断した際にも安全に調査ロボットが停止できるよう、インターロックを設けることで対処した。なお、使用した周波

数帯域は、電波干渉リスクに関してはアンテナの指向性で対処することとし、通信距離・回り込みのどちらも期待できる2.4GHz帯(出力10mW)を選定した。

基地局は高利得パッチアンテナを搭載するが、見通しでの通信距離を最大限確保するため、Photo 8に示すように伸縮ポールで高利得パッチアンテナを10mまで上昇させる仕様とした。伸縮方法は、シンプルで故障が少なく安価であることから水圧シリンダ方式を採用することとした。なお、基地局にもパッチアンテナを併設している。これは、移動局であるマルチクローラ型調査ロボットが基地局に近い位置で活動する場合、中継局を介さずに無線通信をすることを目的としている。

中継局は、運搬する装置上に搭載することで、それ自身が移動可能とすることを想定している。Photo 9に概要を示す。中継局も基地局同様にアンテナ高が高い方が通信距離を確保する上では有利となるが、設置地盤の傾斜や不陸、強風下の転倒のリスクを考慮するとアンテナは低い方がよい。そこで中継局のアンテナ高は、中継局から重機局の目標通信距離500m通信時の電力損失を最小限にし、電波を伝送するためのフレネルゾーンが確保できる最低限の高さの4mとした。伸縮方式は、基地局と同様、水圧シリンダ方式を採用している。

### 5.5 システムの統合

本調査ロボットは、4つの要素から構成され個別に開発を進めてきた。各要素の電氣的統合に統合は、ハード面とソフト面に切り分けて検討した。

ハードの統合で最も重要な点は電源部であり、今回は「走行装置」と「試験装置」を含む上載設備の電源は区別することとした。これは、電氣的故障が他の要素に波及する恐れがないことと、試験装置用電源を使い切っても確実に帰還できることを重視した結果である。

ソフトウェアの部分では、走行や貫入装置の作動など様々な動作を無線通信によって遠隔操作させる必要があり、各要素への入出力信号を一括して取りまとめるシステムの構築が必要となる。調査ロボット上の各要素間の信号ケーブルは、ハードワイヤで行くとノイズが伝播したり電源系統の故障が波及するリスクがあるため、Ethernetによるリンク通信を行うこととした。装置毎の制御機器はPCとPLCが混在しているが、マスターPLCを設け他のPCおよびPLCとリンクを構築した。Fig. 5にリンク概念図を示す。

統合したシステムはPhoto 10, Fig. 6のようなシステムで遠隔操縦が可能で、短時間の訓練で容易に操縦可能なロボットとなっている。また、様々な機構が組み合わされていることから誤操作を防止するために、Table 3に示すような統括インターロックシステムを組み込んだ。この統括インターロックは、マルチモニタ画面で成立および不成立が確認でき、万が一の場合に備え強制的に解除できる機能も備えている。

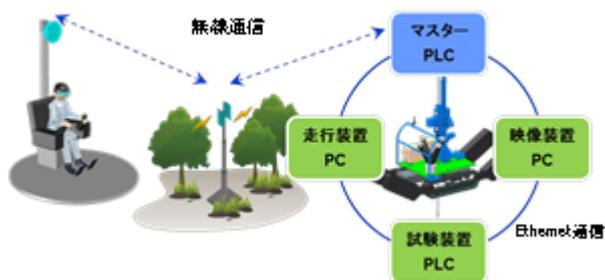


Fig. 5 リンク概念図  
Link Conceptual Diagram



Photo 10 操縦席(マルチモニタ)  
Multi-Monitor Status and the HMD Situation

## 6. 開発ロボットの評価

以上、紹介したロボットは現在も開発を継続中であり、克服すべき課題も残っているが、2015年11月に雲仙においてフィールド試験を実施した。Fig. 7に試験内容と実施場所を示す。

2015年度までに開発した無人調査ロボットは、開発目標の到達度を検証するために、Table 4に示す試験項目毎の目標達成度を検証した。

### 6.1 走行性能の評価

試験場の現地盤を深さ500mm程度まで緩めて加水することでコーン指数200kN/m<sup>2</sup>程度の地盤を造成し、軟弱地盤走行試験場を造成した。また現地の侵食谷を利用し段差走行試験を、平地部に機体全長と同等の約4m間隔でパイロンを配置し、障害物回避走行試験ヤードを作製した。さらに、現地土砂(火山灰質粘性土)を利用し、30°の勾配となるよう勾配走行試験盛土を造成した。

試験の結果、軟弱地盤走行は、目標200kN/m<sup>2</sup>以下に対して150kN/m<sup>2</sup>の軟弱地盤をサブローラを使用せず、Photo 11に示すようにメインローラのみで走破することが可能であった。

段差乗り越えに関しては、目標50cmに対し、Photo 12に示すように高さ60~80cmの現地ガリ侵食を乗り越えることに成功した。しかし、これ以上の段差を乗り越えるには、機体重量を持ち上げる力の増強(サブローラの起倒力アップ)が必要となる事も解った。

障害物回避性能に関しては、Photo 13に示すように、4m間隔のパイロンを俯瞰画像を用いず、TORSOシステムの3Dカメラのみで接触なく回避が行え、目標を達成することができた。

勾配走行に関しては、目標はスリップしない条件で30°の登坂走行を掲げていたが、本試験ではPhoto 14に示すような試験を行った結果、25°勾配までの登坂を達成した。登坂においては対象土質によりサブローラを有効に使うことで登坂可能であると考えられるが、走行装置と操縦に関する課題が残ることとなった。



Fig. 6 HMDに表示される情報  
Display Image of the HMD

Table 3 インターロックシステム  
Interlock List across Each Element

条 件		制限事項
走行装置	走行中	試験装置操作不可
	トラバース中	
映像装置	TORSO-試験装置干渉範囲	試験装置リーダー「倒」不可
	試験装置	
試験装置	走行可状態(リーダー倒)	TORSO試験装置干渉範囲侵入不可
	試験状態(リーダー起)	
		走行装置操作不可

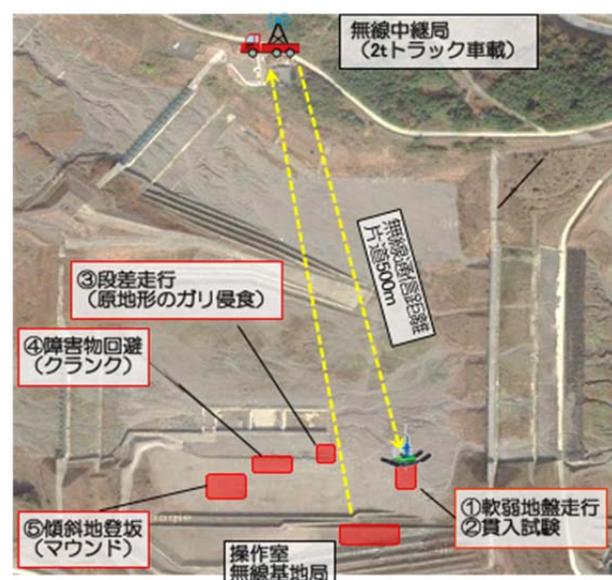


Fig. 7 試験場所と試験項目  
Test Field and Items

Table 4 試験項目  
Test Items

項目	詳細		備考(目標等)
運用	運搬荷姿	2t車による搬入	
	立上時間	2時間未満	
基本項目	走行性能	④障害物回避	パイロン走行
		⑤勾配走行	30°勾配
		③段差乗越	50cm段差
	試験性能	①軟弱地盤走行	コーン指数 200kN/m <sup>2</sup>
②スウェーデン式サウンディング試験		N値 5未満の軟弱地盤 GL-3.0mまでの試験	
期待する項目	空間認知	走行操作に必要な空間認知を3Dカメラ+2D全方位カメラで行う	俯瞰画像を用いず遠隔走行
		周辺音の取得	周辺観察用
	無線通信	長距離無線通信	
		スループット10Mbps以上 総遅延 300msec 未満	



Photo 11 軟弱地盤走行試験  
Soft Ground Running Test

## 6.2 地盤探査試験結果

6.1で造成した軟弱地盤ヤードは地盤探査試験場も兼ね、中央部で貫入試験を行えるようN値5程度の地盤を再現するため、3mの深さまで地盤を緩めた上、表層1.5mは粘性土と置換し互層地盤を作製した。今回のロボットは遠隔操縦によるスウェーデン式サウンディング装置を搭載しており、貫入試験で得られたW<sub>sw</sub>とN<sub>sw</sub>から稲田式計算式にて換算N値を求めることができる。試験はこの造成地盤で4回実施し、試験結果とあらかじめ解っている地層と比較した結果をFig. 8に示す。

試験結果は、いずれも同様の特性を示し、再現性が高いことがうかがえた。また本装置には試験装置のロッド近傍にマイクを設置しており、基地局操作室にてスピーカーから発する音を確認したところ、互層の境で音が変化する様子も確認できた。

## 6.3 空間認知試験

今回の試験では、従来の無人化施工のように俯瞰画像に頼るのではなく、TORSOシステムを用いた3Dカメラと2D全方位カメラを併用して走行操作および試験が可能であることを検証した。試験時と障害物の無い平地走行では、2D全方位カメラによる画像試験を実施し、十分な空間認知性能を有していることが確認できた。

一方、走行に慎重を期する必要がある障害物の回避動作や段差乗越え動作には、3Dによる運動視差や両眼視差による遠近感の把握が有効であることを確認した。

なお、今回の試験に参加したオペレータは、特別な訓練を行ったのではない。Photo 12は実験に立ち会われた評価委員の方の体験状況を示しているが、おおむね好評であった。目視に近い3D画像により、搭乗操作と同様の空間認知性・操作性を両立することで、特殊技能を持たないオペレータでも遠隔作業が行えることが今回の実験で検証できた。

## 6.4 無線通信

立木等の通信障害がある災害地を想定し、無線中継局を設けて基地局⇄中継局・中継局⇄移動局間ともに500m



Photo 12 段差乗り越え試験  
Ground Step Driving Test



Photo 13 スラローム走行試験  
Obstacle Avoidance Test



Photo 14 勾配走行(登坂)試験  
Uphill Situation (Collapse Traveling Trace)

離し、計1,000mの長距離で無線通信を行った。使用した無線周波数帯は2.4GHzである。

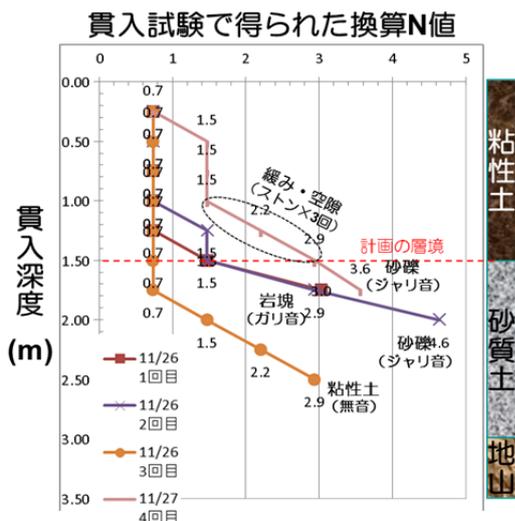


Fig. 8 遠隔操縦によるスウェーデン式サウンディング試験結果と地盤の比較結果  
The Results of Swedish Sounding Test



Photo 15 NEDO評価委員による操縦の体験状況  
(TORSOによる視界と操縦状況の確認)  
TORSO Robot Experience Situation

操作信号や試験データの長距離通信性能をおおむね確認できたが、同日に実施したDRONEの周波数帯域との混信もあり、今回の試験で改めて無人化施工には安定した無線通信が必須であることを認識させられた。より安定的な無線通信を確保するために、無線周波数帯の再選定や、無線通信の2重化などの検討も必要であると考えられる。

## 7. まとめ

今回の「遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの開発」により、今まで災害発生直後の初動段階において、有人での調査に頼らざるを得なかった作業が、幾つかの課題は残るものの、遠隔操作にて崩落地盤を走破し原位置でスウェーデン式サウンディング試験を実施することで、現地の状況とともに地盤性状の物性調査をリアルタイムに取得することが可能となった。こ

れにより、応急対策・復旧計画立案に必要なデータを迅速かつ正確に取得することができ、有人調査による二次災害リスクの低減、応急復旧工の早期着手・精度向上に寄与するものと考えられる。

今後は信頼性や耐久性を十分確保するとともに、調査範囲や調査項目を広げ、DRONEにより取得した地形データ等やGNSSによる測位データと連携を行うことで、より現場で有用な技術となり得るよう引き続き改良を重ねていきたい。

## 謝辞

今回開発したロボットは、2014年度から2年間、NEDOから委託を受けた「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト/インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」のうち「遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボット」の研究開発成果である。

## 参考文献

- 1) 古屋 弘：(総説)建設事業における情報化施工 (ICT)の活用, 基礎工, Vol.40, No.5, pp.2-7, 2012.5.
- 2) 建設無人化施工協会 技術委員会:無人化施工の推移と展望, 建設の施工企画, 2006.11
- 3) 猪原幸司他：災害復旧における遠隔操作式建設機械の現状と最新の工事事例, 建設機械, 2005.5
- 4) 古屋 弘, 栗生暢雄, 清水千春: 3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」の開発, 大林組技術研究所報, No.76, 2012.12
- 5) Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki, Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi : TORSO: Development of a telexistence visual system using a 6-d.o.f. robothead, Advanced Robotics, Vol.22, No.10, pp.1053-1073, 2008
- 6) Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, Susumu Tachi : Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in telexistence, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5112-5118, 2012.10
- 7) Charith Lasantha Fernando, Mhd Yamen Saraji, Yoshio Seishu, Nobuo Kuriu, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi : Effectiveness of spatial coherent remote drive experience with a telexistence backhoe for construction sites, In Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT - EGVE '15), Eurographics Association, Kyoto, Japan, pp. 69-75, 2015.10