

土工用建設ロボットの開発における新たな挑戦

無人化施工機械から地盤探査ロボット開発の概要紹介

古屋 弘・森 直樹・小林 和彦

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、近年無人化施工機械は一般的になり、その他多くのロボットが開発されている。筆者らはこれらのロボットのの一つとして、2011年に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」を開発したが、今回、既存のバックホウに簡易着脱可能な汎用遠隔操縦装置を開発し、さらに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。本報文では、これらのロボットの開発概要と成果の一部を紹介する。

キーワード：建設ロボット、遠隔操縦、無人化施工、災害調査、地盤調査

1. はじめに

国土交通省の建設ロボット技術の定義では、「建設施工・調査の現場で用いられる機械・機器に、何らかの新しいメカニズムや制御・情報処理の機能を付加することにより、作業の支援や、自動化・遠隔制御化を実現し、効率、精度、安全などの性能向上・課題解決を可能にする技術」とされていることから、近年のシールドマシンなどもシステムも含め建設ロボットであり、土木分野では多くのロボットが既に実用化されていると言える。近年では、災害現場において遠隔操縦型の無人化施工機械が投入され、復旧活動に当たることも一般的になりつつある（写真—1）。この遠隔操縦型の重機は建設ロボットの代表的なものとされている。さらに、社会インフラの老朽化に対する調査点検の重要性も再認識され、新しい調査点検手法が幾つか提案されているが、その技術の一つとしてロボット化があり、遠隔操縦による調査ロボットや、自律式のマルチコプター（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。



写真—1 災害復旧で活躍する無人化施工機械（玉石重機㈱提供）

このように、近年の建設分野でのロボット開発の目的は、災害復旧に代表される危険作業の代替と、高齢化や減少が進む技能工の代替が主目的となりつつあるが¹⁾、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。このため以下のようなロボット開発における課題がある。

- 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が高額
- 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・速度の制約による機能の制約が発生する可能性

筆者らはこれらの課題3)、4)に対して、2011年に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」を開発し、遠隔操縦室のオペレータにリアルな情報を提供することにより操縦の支援を行い、施工効率の低下を大幅に低減することに成功した²⁾（写真—2）。

無人化施工の専用機も販売される一方、課題2)に対する解決策として、既存機械を遠隔操縦する搭載型ロボットの開発も活発になってきている^{3)~5)}。筆者らもこの課題に対して、バックホウを対象としたシンプルな機構の着脱可能な遠隔操縦装置を新たに大裕㈱と共同開発した。さらに、上記の課題解決の取り組みとは別に、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2014年からNEDOの助成を受け開



写真一 2 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」



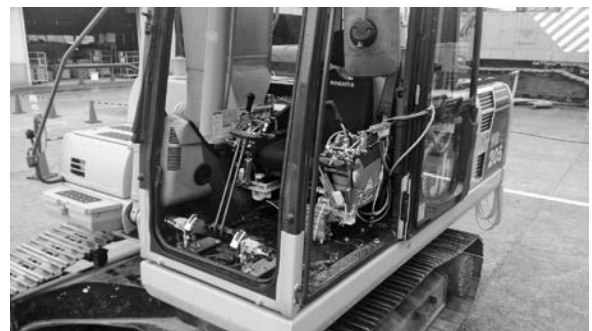
発中である。以下これらのロボットの概要を紹介する。

2. 汎用遠隔操縦装置の開発

無人化施工建機は、遠隔操縦を行う特殊性による「価格の高さ」が課題であり、災害現場に限らずニーズは高まりつつある。これは、2014年から国土交通省より「次世代社会インフラ用ロボット技術 現場実証」の応急復旧部門においてニーズが示されたことも大きな要因となり、各機関は現場適用を加速させている。しかし、その価格が原因で導入台数が少ないことから、調達が容易でないことが課題となっている。無人化施工機械が高額になる原因としては、例えば既存のラジコンバックホウは、油圧系統に別途ソレノイドバルブ等を設け、それを遠隔操作することで重機を操縦することを基本としていることから、油圧ユニットに大がかりな改造を要するためである。

一般的に重機などの有形固定資産は減価償却費を小さくし、さらにこの償却費用の回収をできるだけ一定にすることが望まれる。前者は導入費用を抑えるか償却期間を長くすることであるが、総合工事業用設備の償却期間は一般的には6年であることから、導入費用を抑えることが重要である。後者に関しては、製造業のように減価償却費が製造原価の一部を構成され、製品製造が比較的安定しているような場合と異なり、建設業は請負業であることから、減価償却費の回収を予測することは難しく、できるだけ稼働率を上げることでしか対応できないのが現状である。施工業者がレンタル機械に頼るのもここに原因がある。

このような背景から、一般の重機を容易にしかも安価に遠隔操作化できる装置があれば、上記の問題を解消でき、無人化施工機械を利用できる機会の増加に対応が可能となるものと考え、汎用遠隔操縦装置「サロゲート」を開発した(写真一3, 4)。このサロゲートは、汎用の建設機械運転席に「後付け」で装着するこ



写真一 3 汎用遠隔操縦装置「サロゲート」概観



写真一 4 遠隔操縦状況

とにより遠隔操縦を可能にし、以下のような特徴を有する装置である。

- 1) 遠隔操縦専用機に対して大幅にコストを縮減
- 2) シンプルな機構であることから複数のメーカーや機種に対応可能
- 3) 脱着が容易で取り付け時間は2時間程度
- 4) 装置を装着状態でも搭乗操作が可能である

システムは、左右手元アクチュエータ(電動シリンダー)、左右足元アクチュエータ(サーボモータ)、リモコン、制御盤、回転灯から構成され、429 MHz帯の特定小電力無線を用いて遠隔操縦を行う仕様である(写真一5)。遠隔操縦オペレータに操縦性に違和感を持たせないように、操作レバー入力に対する応答性(操

操作用レバー側アクチュエーター

走行用レバー側アクチュエーター



サーボモーター+円弧状ギヤで操作

片側重量：11kg+プラケット部2kg

写真—5 各部制御機構（アーム・バケット操作，走行操作）



写真—6 装置装着状態での有人操作

作性)を，オペレータの操作感覚に合わせてタッチパネルから微調整（動作特性変更）を可能としている。なお，記載した特徴のうち2)，3）に関しては開発途中の部分があるが，4）に示す機能は本装置の大きな特徴である。災害現場で利用される場合には，当初から無人化を実施することが想定されるが，一般作業においても危険な作業時に無人化を行うなど，有人操作と無人操作が混在する作業も予想される。本装置では即座に搭乗操作と遠隔操縦を切り替えることも可能で，有人操作による効率的な作業と，危険作業時の安全確保のための無人化施工を両立することを可能とした（写真—6）。

本装置は，現状では重機のエンジンスタートや緊急停止に伴う伝送系へのシステム介入が必要なことから，取り付けにやや時間と工夫を要しているが，さらなる簡素化を進め対応機種を増やすための開発を継続中である。

3. 災害対応型ロボットの開発

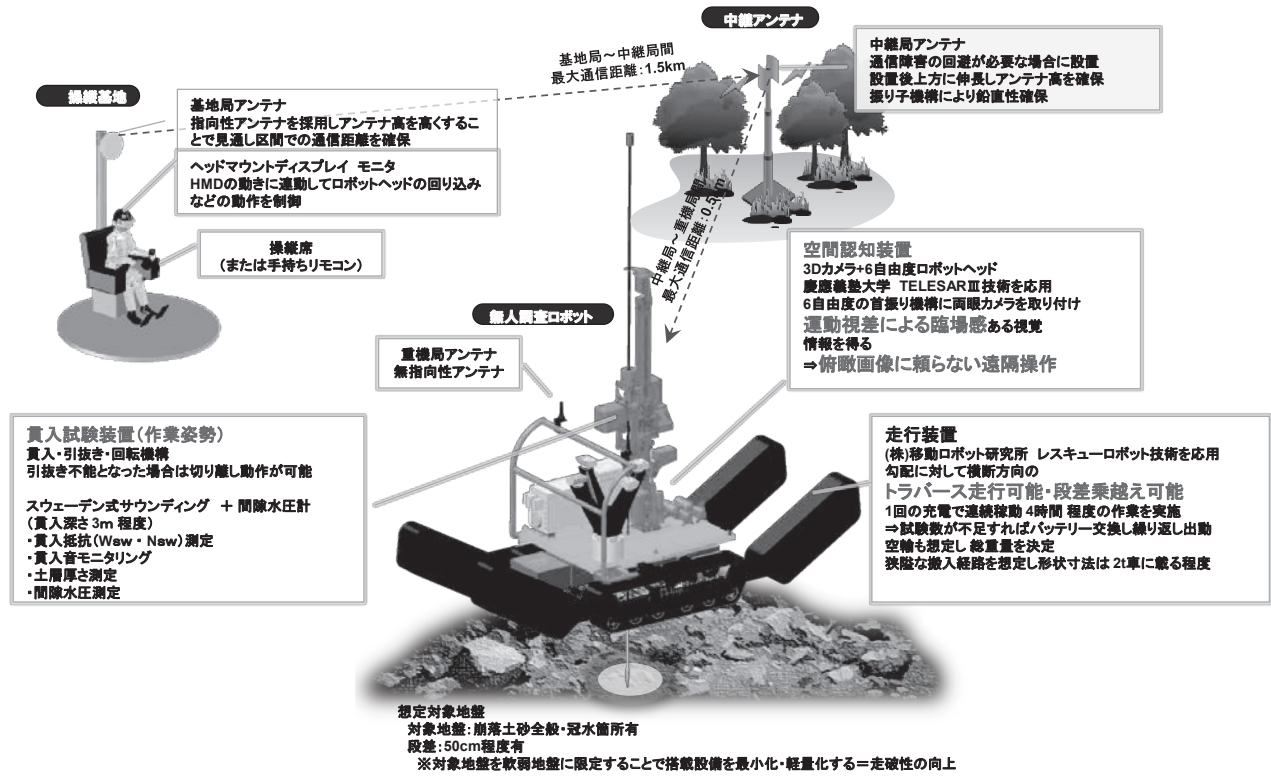
近年，我が国は不幸なことに，数多くの自然災害にさらされ，多くの被害を受けている。これらの災害復旧や社会インフラの再構築に，無人化施工技術は少な

からず寄与している（表—1）。災害は噴火，地震，豪雨など多岐にわたるが，結果的に土砂災害が起こることが多く，筆者らはこの土砂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「マルチクロウ型遠隔操縦無人調査ロボット」の開発に着手した（図—1，写真—7）。このロボットは，災害地の初動調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。

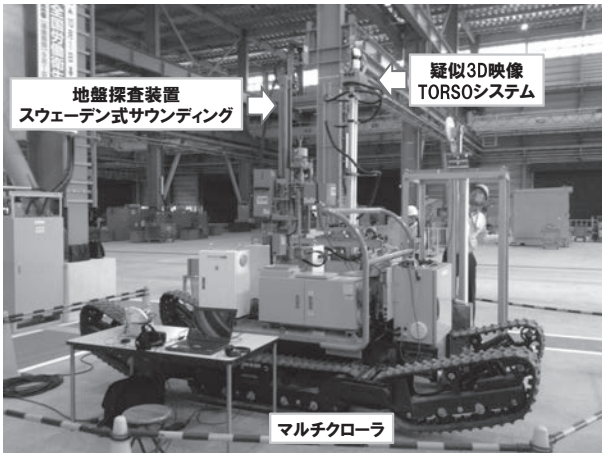
- 1) 安全な場所からの探査：操縦地点と災害調査地点の間の2 kmの往復を可能とする
- 2) 泥濘地（軟弱な地盤）での走破性能の確保（コーン指数 200 kN/m²での走破性の確保）
- 3) 登坂能力：傾斜 30 度，段差 50 cm を走破

表—1 近年の大規模災害（1993年～2016年）

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～）三宅山噴火：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）



図一 1 マルチクローラ型遠隔操縦無人調査ロボットの概要



写真一 7 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

- 4) 災害発生直後の弱い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6軸両眼カメラヘッドロボット(TORSO)^{6), 7)}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

このロボットの機能要件を設定の根拠は次の通りである。(株)大林組がこれまで対応にあたった土砂災害現場の状況を分析し、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から、遠隔操

縦できる距離を2kmと設定した。この災害発生地点では、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、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ることが多い。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 200 kN/m^2 未満とされるため、この状況下の軟弱地盤でも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。

(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。これはメインクローラに前後サブクローラを追備したもので、今回の仕様に合わせてスケールアップし、試作機を製作し要素試験を実施し改良を行った(写真一8)。



写真一八 開発したロボットの走行装置

駆動はモータとし、クローラは、全装備重量2t以下を目標としたことから、重量の比較的軽い芯金入りゴム製クローラとした。

(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。本開発では、陸路からアクセスし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。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。

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、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、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（写真一九）。



写真一九 ロボットに搭載する貫入試験装置

(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である。特に今回のロボットのように災害の初動調査を目標とした場合は、俯瞰カメラの設置は時間的に困難である。このため、今回はトレイ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）⁸⁾）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（写真一〇）。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。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い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。

(4) 無線通信システムの開発

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



写真—10 屋外用 TORSO の外観と HMD を装着した遠隔操縦の状況

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 2 km のうち 1.5 km 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 500 m となり、移動局は散在する岩塊や樹木等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。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 2.4 GHz 帯（出力 10 mW）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、伸縮ポールで高利得パッチアンテナを水圧シリンダで 10 m まで上昇させる仕様とした。

中継局は、運搬する装置上に搭載することで、それ

自身が移動可能とすることを想定している。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、設置場所がより災害地に近くなることを想定し、地盤の傾斜や不陸、強風下の転倒のリスクを考慮し、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 4 m 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（写真—11）。

(5) 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。

軟弱地盤上の走破性能、段差乗り越え性能とも、当初の設定条件以上の性能を有することを確認したが、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 25° 勾配までの登坂となった。登坂においては雨天後での実験



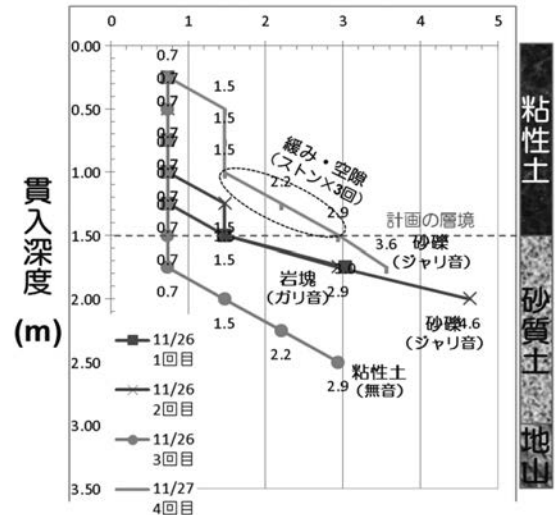
写真—11 自動昇降アンテナを有した基地局（左）と中継局（右）

であったことも影響したが、対象土質によりサブクローラをさらに有効に使うことで登坂可能であると考えられ、走行装置と操縦に関する課題が残ることとなった（写真—12、13）。

地盤探査の性能に関しては、試験場に3mの深さまで地盤を緩めた上、表層1.5mは粘性土、その下部1.5mを砂質土に置換し互層地盤を作成した。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結果から換算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を行った（図—2）。試験結果は、いずれも地層の境界を明確に捉えるとともに同様の特性を示し、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、互層の境で音が変わる様子も確認できた。

また、今回の試験では、俯瞰画像に頼らず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全方位カメラでも十分な空間認知性能を有していることが確認できたが、走行に慎重を期する必要がある障害物の

貫入試験で得られた換算N値



図—2 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

回避動作や段差乗り越え動作には、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く、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。

4. おわりに

本報告では、建設分野における2つのロボット化の挑戦に関して概要をまとめた。

汎用遠隔操縦装置に関しては、無人化施工機械をより身近に使える環境を作り、常時の作業におけるオペレータに対する安全性の確保を目指すとともに、災害時により多くの無人化施工機械を提供できるよう、さらなる開発による適用機械の拡大とコストダウンを目指すこととしている。



写真—12 段差乗り越え試験



写真—13 勾配走行（登坂）試験（写真右はスリップ痕）

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では、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を可能とした。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。

一方、遠隔操縦においては無線通信が必須であり、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ことも開発中の課題として浮かび上がった。このような課題を解決しつつ、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のうち災害対応型ロボットは、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。

J C M A

《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) 古屋 弘，栗生暢雄，清水千春：次世代無人化施工技術の開発—3D

映像及び体感装置を用いた遠隔操作—，第13回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.109～116，2012.9.

- 3) 藤本 昭，松岡雅博，茶山和博，藤岡 晃，遠隔操縦ロボット (ロボQ) の開発，土木学会第58回年次学術講演会，pp.61-62，2003.9.
- 4) https://www.jacic.or.jp/movie/jseminar/pdf/movie20151008_toyoda.pdf
- 5) <https://www.asratec.co.jp/robot/dokarobo/>
- 6) 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
- 7) Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatashi 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.
- 8) Charith Lasantha Fernando, Mhd Yamen Saraiji, 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.

【筆者紹介】

古屋 弘 (ふるや ひろし)
 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部
 上級主席技師



森 直樹 (もり なおき)
 (株)大林組 機械部
 課長



小林 和彦 (こばやし かずひこ)
 (株)大林組 東京機械工場
 副部長

