

簡易取付可能なIMUを複数用いた 遠隔操作型バックホウの姿勢提示システムの開発と評価

○速水 邦晃（東北大学），山内 元貴（東北大学），永谷 圭司（東北大学）

Development and Evaluation of Attitude Presentation System of Remote-Operated Excavator using Additional Installation Devices with IMU

○ Kuniaki HAYAMI (TOHOKU Univ), Genki YAMAUCHI (TOHOKU Univ),
and Keiji NAGATANI (TOHOKU Univ)

Abstract : During remote control operation of excavator for performing emergency restoration works, it is important to acquire its pose for stable motion. To realize such pose-estimation for conventional excavators, we developed an easy-to-install IMU-device and its status display, and conducted some initial experiments on a real excavator. In this paper, we introduce our sensing system, and report the experimental results.

1. 緒言

日本は、大雨や地震、火山噴火といった自然災害が多く発生する国であり、そのような大規模災害が発生すると、家屋の倒壊や地形の変化などが起きる。こうした現場では、瓦礫の撤去や仮設道路工事、水防活動といった応急復旧が行われ、建設機械が使われる。しかし、応急復旧を行う現場は、作業の安全が十分に確保されない危険な箇所であるため、作業員の二次被害の危険性等が伴う。そのため、そのような危険な箇所での応急復旧作業では、遠隔操作が可能な建設機械を用いた無人化施工が利用されてきた。

この無人化施工技術は、人が立ち入ることのできない危険な作業現場・災害現場における二次災害を防ぐ災害緊急対策として、建設機械を遠方より遠隔操作し施工を行う工法である（図1）。無人化施工は1994年の雲仙普賢岳の噴火を契機に、システム化技術や画像伝送技術、無人での施工法などの開発が発展してきた[1]。現在は数km離れたところから遠隔施工が可能[2]となっており、また、これまでに災害復旧工事を中心に170近くの適用事例がある。さらに、この技術は、東日本大震災がきっかけで起こった福島第一原子力発電所の汚染瓦礫の撤去作業などでも適用された[3]。しかしながら、遠隔操作可能な建設機械は、無人化施工以外での用途が限られてしまうため、また一台一台の価格が高く国内保有台数が限られていることから、災害現場で利用するために長距離輸送が必要になる場合が多く、さらに、大きさや最大重量といった輸送制限の点からも時間を要する。

また、建設機械の遠隔操作では、オペレータが作業状態や周囲の状況をいかにリアルタイムで、かつ正確に把握できるかが重要な課題であり、近距離での目視による操作が



Fig. 1: Unmanned Construction (引用元:資料提供;NPO法人 土砂災害防止広報センター)

困難な場合、遠隔操作可能な建設機械を単体で運用することが難しく、外部に設置したやぐらや無人カメラ車が撮影する第三者視点が必要となる[4]。既存の無人化施工技術では、このような無人カメラ車といった無人化施工特有の機材調達が必要であり、着工までに特殊車両通行許可申請などを含めて、最短10日程度を要すると言われている[5]。

これらの問題の解決を目指し、株式会社フジタのロボQ[6]を代表とする、一般の建設機械の操縦席に取り付けることで遠隔操縦を可能にする遠隔操縦ロボット[7]などが提案されてきた。しかしながら、装着可能な建設機械の機種が限られるという問題や、ロボットの重量が大きいため現場までの運搬が問題となり、加えて、建設機械への設置に時間がかかるといった問題もある。

そこで、我々の研究室では、汎用建設機械の中でも瓦礫や崩落土砂の撤去などで必要とされるバックホウの遠隔化を対象として、災害発生後の応急復旧作業時に、汎用の建設機械を遠隔化するシステムの構築に関する研究開発を進めてきた。このシステムの特徴は、汎用の建設機械に特別

な改造を施すことなく、後付けで簡易に取り付けるデバイスでバックホウを無人化することを目指している点であり、操作レバーを動かすためのアクチュエータ部、建設機械の姿勢情報などを取得し提示するセンシング部、映像を得るためのカメラ部からなる。汎用の建設機械であれば、全国各地に配備されており、提案するシステムを設置するだけで災害対応が可能になると期待できる。

本研究では、このシステムのうち、建設機械の姿勢情報を取得し提示するシステムについて研究開発を進めてきた。具体的には、建設機械の姿勢を推定する方法として、各作業装置であるブーム、アーム、バケットの角度から順運動学を用いて推定することを考え、これらの角度を求めるために必要となる加速度と角速度が測定できる IMU センサを用いて、建設機械への取付が簡易な小型デバイスを開発した。さらに、遠隔操縦者への姿勢情報の提供を想定し、開発した小型 IMU デバイスを用いて推定される建設機械の姿勢を提示するシステムを構築した。また、開発した小型 IMU デバイスで取得する作業角度を用いて推定する建設機械姿勢を評価するため、実バックホウを用いた姿勢推定試験を行った。本稿では、開発したシステムの紹介と、実施した試験について述べる。

2. 建設機械姿勢推定システムの開発

災害発生時に迅速な応急復旧作業を可能とする建設機械の無人化施工システムにおいて、遠隔で操縦する建設機械の姿勢情報は、操縦者の操作を補助し、作業の正確さとスピードを実現するために必要である。特に、作業中の姿勢によって転倒する危険性があるバックホウにとって、転倒の危険を把握し安全な姿勢で遠隔作業することが大変重要となる。これまでの無人化バックホウの一部には、関節角度の検出用のポテンショメータや、油圧シリンダの伸縮の計測を行うシリンダストローク計が搭載されているが、いずれも建設機械への改造が必要となる。本研究では、一般の建設機械の簡易無人化を想定し、建設機械への改造を必要としないことを特徴とする、簡易取り付け可能な IMU センサを用いた小型デバイスを開発することとした。具体的には、建設機械の姿勢を推定するため、IMU センサをバックホウのブーム、アーム、バケットに取り付けて関節部の作業角度を取得し、その角度情報を基に、バックホウの姿勢を推定することとした。

2.1 簡易取り付け型小型 IMU デバイス

建設機械の姿勢推定はブーム、アーム、バケットの関節部の作業角度を取得することで求められる。角度の算出に関しては、加速度とジャイロの情報から求めることができ

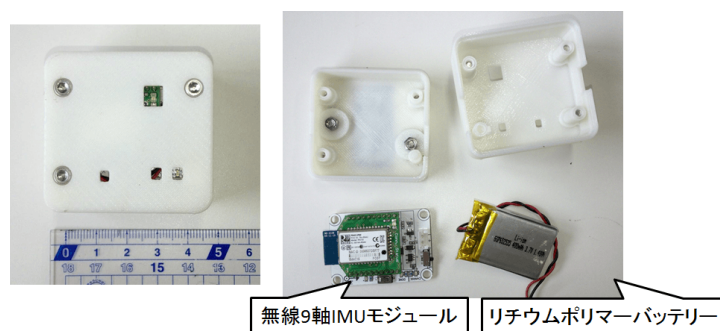


Fig. 2: Small IMU Sensor Device

ることから、それらのデータを取得できる IMU センサを使ったデバイスを開発することを考え、建設機械に簡易に取り付けが可能で取り付けられたリンクの角度が取得できる小型 IMU デバイスの開発を行った。

建設機械の各リンク回転角度を取得する開発した簡易取り付け型小型 IMU デバイスの概要を図 2 に示す。小型 IMU デバイスは、バッテリーにリチウムポリマーバッテリー (400mAh) を使用し、センサモジュールには株式会社アールティが販売している無線 9 軸 IMU モジュールを使用した。このモジュール上には、9 軸センサである IMU(InvenSense 社, MPU9250) とマイコン (LPC1343, 72MHz) が実装され、センサデータの取得とデータの処理を一枚の基板で実現できる。また、デバイスの寸法は、縦 46mm、横 48mm、高さ 26mm、重量 45g であり、先行研究 [8] の時に開発したデバイスと比較すると、デバイスサイズで約 1/10、重量も 1/6 と小型化している。建設機械へは、ネオジム磁石の磁力によって取り付けられ簡易な取付を実現している。建設機械に取り付けた際の外観を図 3 に示す。この図に示されるように、小型デバイスは、各作業装置の干渉や、土石などが当たらない任意の位置に設置できる。

小型 IMU デバイスでは、3 軸の加速度と角速度のデータから取り付けられた建設機械の作業装置の回転角度を算出する。まず、小型 IMU デバイスの建設機械への取り付け位置に関しては、各作業装置の側面に、その縁に沿わせて設置し、デバイスが縁と平行になるように取り付けることで各リンク角度がデバイスの算出する角度と一致させることとした。なお、初期角度は、加速度の重力方向から見たピッチ角を求め、動作時は加速度とジャイロデータを用いたコンプリメンタリフィルタにより算出している。

2.2 建設機械の推定式

次に、建設機械の機構とバケット先端位置を推定する姿勢推定算出式について述べる。各作業装置の回転関節部を結ぶ形でリンク構造を図 4 に示す。図中のパラメータを用

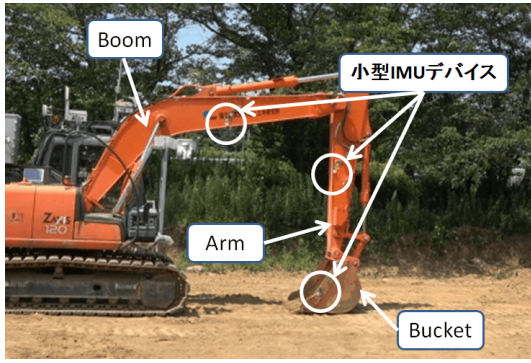


Fig. 3: Mounting Figure

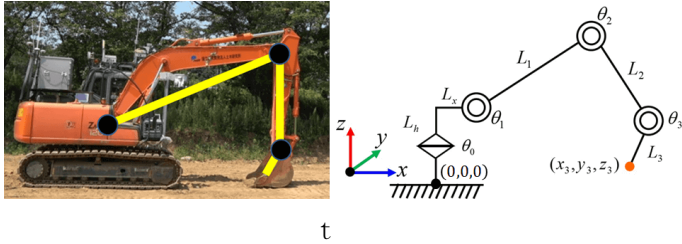


Fig. 4: Link Mechanism

いて、バケット先端の位置は順運動学により以下の式 1, 式 2, 式 3 で幾何学的に求まる。

$$x_3 = \{L_x + L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)\} \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$y_3 = \{L_x + L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)\} \sin \theta_0 \quad (2)$$

$$z_3 = L_x + L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

3. 建設機械姿勢推定試験

開発した小型 IMU デバイスによる関節部の作業角度の算出と、得られた角度情報を用いて順運動学の式を適用することで建設機械の姿勢を推定する姿勢推定システムを評価するため、実際のバックホウを用いた姿勢推定試験を行った。ここで、バケット先端位置を得られる関節部の作業角度を用いて求めた場合、その時のブームとアームの姿勢も一意に決まるため、バケット先端位置の推定を評価することで建設機械の姿勢を推定していると言える。そこで、本試験では、小型 IMU デバイスで取得する関節部の作業角度を用いて求まるバケット先端の推定位置と、測量などで用いられるトータルステーション (Leica Viva TS15) によって測定したバケット先端位置との動作軌跡を比較することで、前後進・旋回動作を除く建設機械のブーム、アーム、

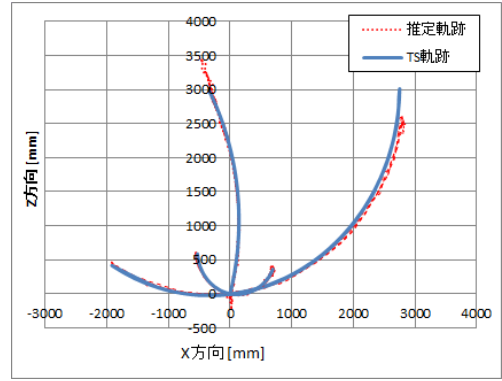


Fig. 5: Motion estimation

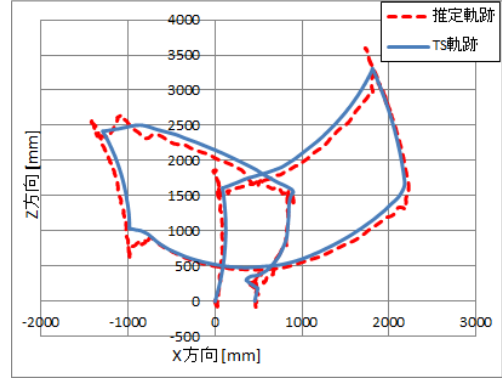


Fig. 6: Motion Estimation -Simulated Drilling Operation-

ム、バケットを動作させたときの推定姿勢の評価を行うこととした。試験内容としては、建設機械のブーム、アーム、バケットをそれぞれ独立に往復させる独立動作と、掘削作業を想定した模擬掘削動作での試験を行い、その時のバケット先端位置の軌跡で推定姿勢システムを評価した。

3.1 試験結果および考察

試験結果として、独立動作時のバケット先動作軌跡、模擬掘削動作時のバケット先動作軌跡を図 5 と図 6 に示す。これらの試験結果 (図 5, 図 6) より、バケット位置推定を比較すると、X 方向は大きくずれることは少なく、最大でも約 20cm の誤差であった。一方 Z 方向では、作業動作を切り替える図 5 の折り返し部分や、図 6 の動作軌跡端部において、最大約 50cm の誤差が確認された。この誤差の要因として、作業機の動作の折り返しや切り替え時において、作業機に衝撃が発生し、その衝撃が小型 IMU デバイスの三軸加速度センサに乗ったのではないかと考えられる。この種の高周波の誤差については、三軸ジャイロ스코プを用いてフィルタリングすることを想定していたが、今回は、そのフィルタの調整が十分でなかった可能性がある。

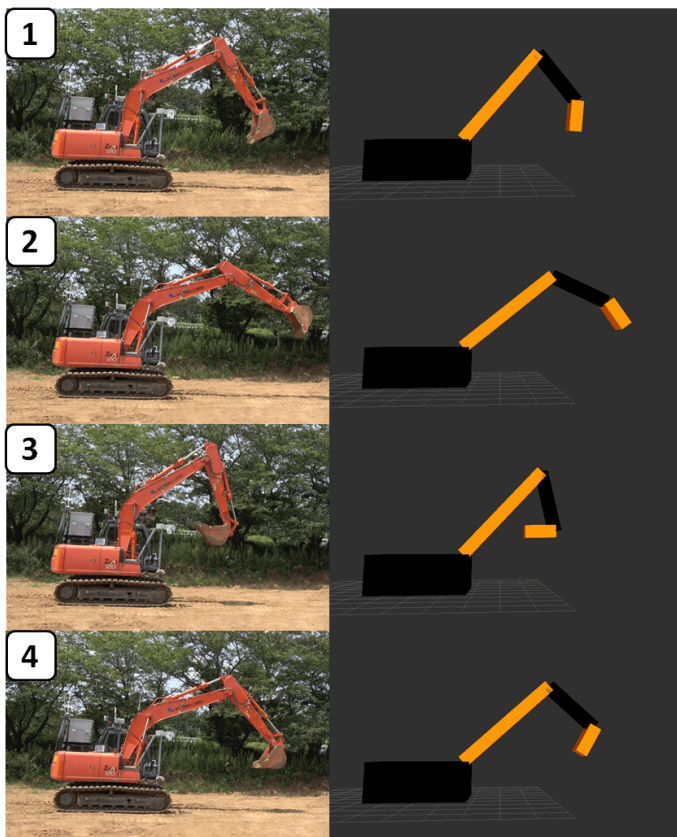


Fig. 7: The pose estimation of the backhoe

4. 建設機械推定姿勢提示システムの開発

無人化施工において、遠隔で操縦する建設機械の姿勢情報は、オペレータの操作を補助し施工効率の向上に役立つと共に、遠隔地の建設機械転倒の危険を把握でき、安全な姿勢で遠隔作業することにつながる。そこで、開発した小型 IMU デバイスで推定した姿勢の提示システムを開発した。

今回、リアルタイムに建設機械の推定姿勢を提示する方法として、ROS(Robot Operating System)を用いたソフトウェアの開発を行った。ROSの可視化ツール Rviz で簡略化した建設機械モデルを作成し、そのモデルに小型 IMU デバイスで算出できる各関節角度を与えることで、建設機械の推定姿勢を提示するシステムを構築した。

第3章の建設機械姿勢推定試験における模擬掘削動作について、開発した本システムにおいて提示した3Dモデルの姿勢と、実際のバックホウの姿勢とを比較したものを図7に示す。この図より、開発した本システムで提示するモデルにより、建設機械の動作姿勢を十分に把握できることが分かった。

5. 結言

本稿では、災害対応を行うことを目的とした汎用の建設機械による無人化施工の実現を目指し、簡易取付型姿勢推定デバイスの開発と実際のバックホウを用いた姿勢推定試験および、建設機械姿勢提示システムの開発について述べた。

試験の結果より、建設機械の関節部の作業角度を取得する小型 IMU デバイスを簡易に取り付けることで、バックホウの姿勢を推定できることがわかった。また、得られる各リンク角度からリアルタイムに姿勢を提示するシステムでは、実際のバックホウの動作を3Dモデルより十分に把握することができると分かった。

今後は、建設機械のエンジンや移動・作業時に生じる本体振動等を考慮し、建設機械の移動や旋回動作を含めた姿勢推定、および、その提示を目指したシステムの開発を行う予定である。

6. 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。また、実機試験については、国立研究開発法人土木研究所にご協力頂きました。ここに謝辞を表します。

参考文献

- [1] 植木 睦央, 猪原 幸司, 北原 成郎, “「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて”, 建設マネジメント技術, 6月号, pp.45-53, 2013.
- [2] 新田 恭士, 松尾 修, 北原 成郎, 黒田 昇, 田村 圭司, 下田 孝徳, “超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察—雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要—” 建設ロボットシンポジウム論文集, 2011.
- [3] 領木 紀夫, 田中 敬二, 石川 利行, “多種多数機械を用いた無人化施工システムの開発(福島第一原子力発電所災害復旧工事における遠隔操作)” 建設の施工企画, 11月号, pp.32-37, 2012.
- [4] 近藤 高弘, 青木 浩章, 宮崎 裕道, “建設業における無人化施工の現状と将来”, 大成建設技術センター報, 第44号, pp.19-1-7, 2011.
- [5] 新田 恭士, “災害復旧に貢献する無人化施工技術”.
- [6] 木村 直紀, 小阪 高志, 牧野 千代春, “遠隔操作ロボット(ロボQ)の今後の展開” 建設の施工企画, 7月号, pp.10-14, 2012.
- [7] Takahiro Sasaki, Takayuki Nagai, Kenji Kawashima, “Remote Control of Backhoe for Rescue Activities Using Pneumatic Robot System”, 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3177-3182, 2006.
- [8] 速水 邦晃, 西村 和真, 亀岡 遼太, 永谷 圭司, “複数の追加設置型 IMU 搭載デバイスを用いたバックホウの姿勢推定” 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.2316-2319, 2015.