

油圧ショベルによる IT 施工システムに関する研究 —掘削積込作業の自律化にむけて—

山 元 弘・茂 木 正 晴・大 槻 崇

土木施工は、危険・苦渋作業がいまだに多く存在している。これらの劣悪な作業環境を改善し、安全を確保することが喫緊の課題である。また、他産業に比べて IT の導入が遅れており、業務の効率化、コストの低減、品質向上のための技術開発が求められている。そこで、国土交通省総合技術開発プロジェクト「ロボット等による IT 施工システムの開発」が実施され、情報技術 (IT)・ロボット技術 (RT) を活用し、土木施工における危険・苦渋作業の解消や熟練者不足への対応に向けた研究開発を実施した。本稿では、ロボット技術 (RT) を中心とした技術開発として油圧ショベルの自律化に向けた研究について報告する。
キーワード：油圧ショベル、自律化、情報通信技術、ロボット技術、3次元情報

1. はじめに

土木工事は、災害復旧現場などの危険・苦渋作業がいまだに多く、安全対策のため、一部で遠隔操作方式の無人化施工の技術開発が進められてきた。しかし、有人施工と比較して作業効率が低く高コストであり、災害復旧現場等の大規模で特殊な施工現場への限定した適用にとどまっている。

一方、一般の施工現場においても若年労働力不足や熟練者不足、IT 導入の遅れによる業務の非効率性等の課題に対処していく必要がある。

本研究は、国土交通省総合技術開発プロジェクト「ロボット等による IT 施工システムの開発」(H15～H19、以下「総プロ」)の一環として進められたものである。情報技術 (IT)・ロボット技術 (RT) を活用し、土木施工における危険・苦渋作業の解消や熟練者不足への対応として、3次元情報を活用しつつ、建設機械 (油圧ショベル) の自律化に向けた基盤技術に関する研究開発を行った。

本研究で対象となる油圧ショベルは、諸工種に共通する土工に用いられる汎用的で数の多い建設機械であり、自律化については過去にも取り組まれてきたが、難易度と期待性能、費用、現場実態等から市場性が見えず、また不況から好況への急転換、厳しい排ガス規制対応開発等もあり、近年では民間での新技術開発が進んでいない状況にある。一方、情報・通信・計測・制御技術の高速・高精度・安価化が昨今進んでおり、総合技術開発プロジェクトにおいて建設機械 (油圧

ショベル) の基盤技術を向上し、機体性能の見通しや今後の課題を明らかにしておくことが要請されたことから本研究開発が行われるものとなった。

本報告は、IT 施工システムに関して油圧ショベルにおける掘削積込作業の自律化に関する研究開発の概要と技術開発によって得られた知見について述べる。

2. 研究概要

本研究では、建設機械の IT 施工技術の実用化を目的として、その基盤となる以下の要素技術の研究開発を行うとともに IT 施工システムのプロトタイプの開発を行った。

- (1) 施工状況の 3次元情報の計測システム
- (2) IT 施工操作システム (マンマシンインターフェイス)
- (3) ロボット建設機械の自動制御システム

本研究では、代表的汎用建設機械である油圧ショベルを研究開発の対象として、図 1 に示すように IT・RT を、現実的な範囲で最大限導入し、基盤技術に取り組んだ。

油圧ショベルは種々の作業があるが、手法の転用を念頭に、溝掘削積込作業を対象とした。設計形状の 3次元情報をもとに、作業中に変化する地形形状を計測し、これに応じた掘削積込動作を計画して機械を制御し、熟練オペレータの施工精度と速度と概ね同等の自律作業を行うものとしている。要素技術について研究

開発を進めるにあたり、図-2に示すような複数のシステムに大別し、研究開発を進めた。



図-1 ロボット等によるIT施工システムの開発イメージ

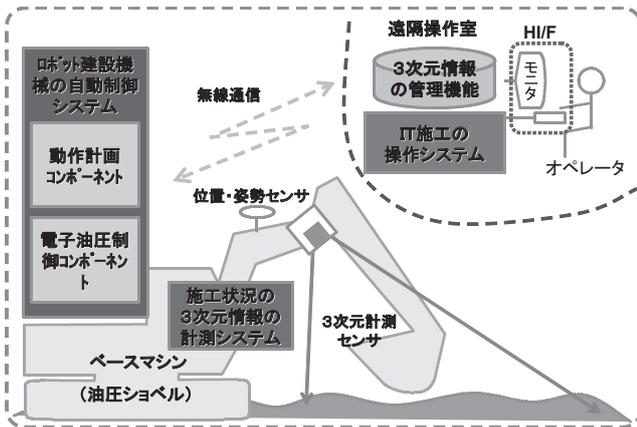


図-2 IT施工システムのプロトタイプ概念図



写真-1 要素技術を装備した実機

3. 研究開発内容

(1) 施工状況の3次元情報の計測システム

ロボット建設機械が自律作業をするには、変化する

作業中の地形の3次元情報を把握する必要がある。このため、揺動するロボット建設機械上に設置したレーザスキャナなどの3次元計測器で3次元情報を計測・座標変換する技術を開発した。

はじめに計測システムを試作し、その後検証実験を繰り返し、改良を継続した。総合計測精度は5cm以内を目標とした。結果としての精度は、通常はセンサ単体の最大誤差が累積はしないこと、GPSが正しい計測値であるとし、ほぼ達成されたものとなった。

システム構成の概念を図-3に示すとともに、それぞれの機能については以下の通りである。

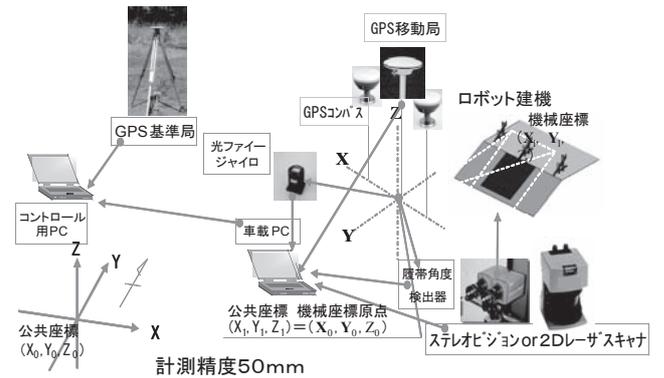


図-3 3次元情報の計測システムの概要

(a) 自機位置

自機位置把握には、RTK-GPSと自動追尾トータルステーションが選択肢となるが、使用場面の汎用性と計測頻度からRTK-GPSを選択した。TSの場合、油圧ショベルが旋回する時にミラーがブームやアームに隠れ、追尾できなくなる可能性が想定された。また計測頻度は、周囲計測やバケット位置把握の根本となるものとして、最低10Hzの確保を想定した。

GPSアンテナ取付位置は、他の搭載物の位置関係もあり、上部旋回体の後端中央とした。精度としては、(何が正しい計測値なのかの問題もあり、)水平2cm、鉛直3cm以内を想定している。計測遅延は60msec、頻度は10Hzである。

なお掘削精度に対しては、移動終了後の一連の作業中には、旋回中心の移動はなく、比較的良好な精度が確保可能なものとなった。

(b) 上部旋回体の方位・姿勢

上部旋回体の方位は、GPS位相差方位計と光ファイバージャイロの組合せとしている。

選択肢としては、GPS系とジャイロ系が考えられ、GPS系では、GPS位相差方位計と2基のRTK-GPS(1基は位置と兼用)が選択肢となるが、精度と費用の両

面から、GPS 位相差方位計を選択した。ジャイロ系ではドリフトの問題があり、何らかの方法でゼロ点補正する必要がある。

また、姿勢センサでは、比較的安価な傾斜計での精度と計測遅延の問題があり、比較的高価ではあるが、計測頻度でも利点のある光ファイバージャイロを検討した。

以上から、方位及び姿勢は、光ファイバージャイロとして、一定時間旋回しなかった時に GPS 位相差方位計によりドリフトを補正することとした。

(c) 揺動の対応

周囲計測では、計測器自体の揺動・振動が問題となることが想定される。このため、揺動・振動実験をしたところ、振動についてはほとんど問題がなく、揺動については無視できないことがわかった。計測器が計測した時点にどちらを向いていたかにより補正する必要がある。上部旋回体の揺動の周期は、1Hz 強であり、補正のためには、最低 5Hz、できれば 10Hz 以上の位置・姿勢計測頻度が望ましいとわかった。また計測値には、計測時刻のタイムスタンプが必要である。

(d) 周囲計測

当初、施工現場全体と、施工対象周辺の、両者の実施を計画していた。

前者は、100 m 四方程度を、3次元レーザスキャナにより数箇所で見況地形形状を計測し、これを合成することを想定していた。しかし、応用可能な既存技術があり、ここでは、後者に特化することとした。

後者は、10 m 四方程度を想定し、時々刻々と変化する施工対象を把握し、自律掘削、動作計画に反映させようとするものである。

総合計測精度の目標を 5 cm としているところから、単体計測としては、1 cm 程度が目標となる。

ここでは、レーザスキャナとステレオカメラが選択肢となるが、事前の実験等からステレオカメラの計測時間が長く、計測範囲が限定され、また天候対応等もあることから、レーザスキャナを主とし、ステレオカメラを従とすることとした。

(e) レーザスキャナ

計測密度は、リアルタイム性があることを前提として、施工対象で 5 cm 程度、施工対象周辺の粗なところで 10 cm を目途として検討した。

結果として、施工対象に対し、2次元縦方向で計測し、旋回時に 3次元計測となるものとした。作業装置（ブーム、アーム、バケット）の両側を計測線として 2個の固定設置としており、どちらに旋回しても、掘削直後及び掘削直前の形状が計測可能である。可動装

置は、不要であると判断し、現在までの掘削積込の範囲においては、支障はない。

精度としては、10 m 前方（0.8 m³ 級の場合のバケット先端）で 2 cm 以内を想定している。計測遅延は 10 msec、頻度は 18 Hz である。揺動を補正するため、姿勢センサとともにタイムスタンプをつけて同期を取り、座標変換しており、掘削動作計画に用いている。

(f) ステレオカメラ

ステレオカメラは、ステレオ処理に時間がかかるためリアルタイムの活用より、状況の把握、移動のない範囲での作業後の出来形計測・確認（現在位置での作業の終了確認）に活用するものとしている。

計測時間が問題であり、動作計画に用いるための通信を含む目標時間としては、1回の掘削後、次の掘削動作計画を行うまでとして、想定する掘削サイクルタイム 20 秒から、6 秒間としていた。

これに対して、当初は、精度は高い一方 21 秒を要していた。そこで、高速を要する場合には、精度は 2 cm 以内は許容することとして、処理画素数を実質的に 1/16 とすること等により、通信込みで 7 秒間とした。

これにより、作業後の出来形計測・確認だけでなく、十分ではないが場合によっては、レーザスキャナの掘削直後の計測を代替可能なものとした。

(g) ビデオカメラ

自律動作の補助表示や、非常時の遠隔・介入操作用として手動遠隔で最低限の操作が可能なよう、カメラ動画を準備した。アナログとデジタル各 1 台としたが、デジタルの遅延時間を圧縮等により、0.2 秒に短縮できたため、後述の付加価値からデジタルを主とすることとした。

(2) IT 施工操作システム（マンマシンインターフェイス）

ロボット建設機械が自律作業をするには、計測・座標変換に関する 3次元情報を把握して作業状況が設計データに対して適切であるかを確認するとともに、簡易的な指示を行う必要がある、このための技術を開発した。

(a) IT 操作システム（表示機能）

計測した現況（地形）の 3次元情報や目標の形状（設計）の 3次元情報を重ね合わせて提示する表示技術を開発した。またこの画面上で、作業範囲や作業内容などの簡単な指示を行う技術を開発した。

バケットと設計の相対位置を表示する支援技術については、いわゆる GPS ショベルとして既に実用化さ

れており、これをベースに計測した現況（地形）等をあわせて表示し、自律動作の設定・指示に用いるものである。任意の視点でのCG表示も可能としている。

追加機能としては、自律機能とは切り離し、建設機械のオペレータ（遠隔操作等）に、作業の目標（設計）と現況（地形）の3次元情報と自機の位置などを提示して、作業を支援するシステムのプロトタイプとして、遠隔フルマニュアル操作に関する開発も併せて行った。

表示機能に関しては、基本的に2画面で、CGとカメラ動画像で、ウインドウを展開して画面数を増やすことが可能で、CGは必要なウインドウに自動切替えているが、手動にも対応している。

また、カメラ動画像に、設計線を重ね合わせる表示を可能とした。

原理は、ステレオカメラと同様で、カメラの位置、向き、画角、歪み等が正確に把握され、高速に補正できればよい。精度は、実験計測の範囲では4cm以内、遅延は0.2秒であったが、回転時に設計線の表示遅れがあった。デジタル動画像の遅延短縮技術は、遠隔操作の分野で進んでおり、実用時には、さらなる高速化が期待できると考える。

(b) 3次元情報の管理機能

ここでは、設計や計測の3次元情報を管理し、各サブシステムやコンポーネントと通信する機能も必要であり、3次元情報管理装置とした。設計データとしては、3次元空間データ交換仕様及び一般的なCADデータ交換形式であるDXFに対応している。

設計や計測の3次元情報は、取扱の簡便さと通信量低減から、メッシュデータとして提供することとしている。メッシュの大きさと設定エリア範囲は任意であるが、データ通信量と実用上のバランスから、掘削積込対象範囲に10cmメッシュで設定しており、掘削積込については支障はない。計測密度からは5cmメッシュ程度まで細かくすることは可能であり、今後の作業内容の拡大にあっては、検討を要すると考えている。

また、動作計画や表示を行うためのデータを管理し、必要に応じて処理して、提供する機能がある。主な機能は、以下の通りである。

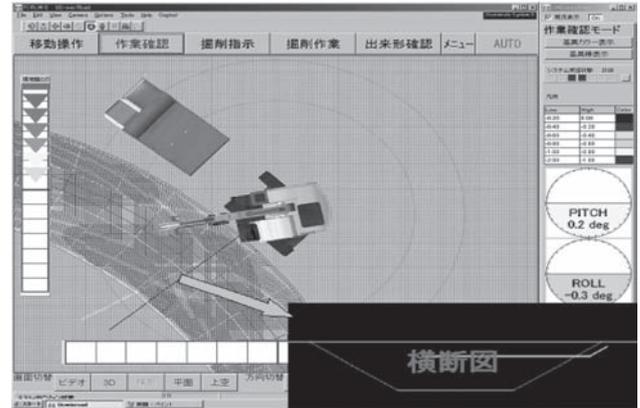
- ①設計データと初期地形データの取込と保持
- ②メッシュの設定
- ③設計や計測値のメッシュデータ生成と提供
- ④建機・ダンプの位置・内界センサデータ保持と提供
- ⑤現況作業状態コードの保持とトリガー提供
- ⑥計画軌跡データの入力と表示への提供
- ⑦掘削対象の設計断面の生成と制御への提供

⑧掘削対象の現況断面の生成と制御への提供

⑨放土対象（ダンプ）の断面の生成と制御への提供

⑩ステレオカメラ計測データの取込と提供

IT（表示・）操作システムと3次元情報管理装置の役割分担は、基本的には、作業中に人間とのやりとりがある事柄か否か、で分けられている。



図一4 IT 施工操作システム

(3) ロボット建設機械の自動制御システム

油圧ショベルを自律作業させるための制御技術は、本研究の中心的位置付けにあり、自動制御システムについては、以下に述べるような研究・開発を行った。

(a) 熟練オペレータ操作時の動き方の把握

自律と熟練オペレータ操作での作業装置の軌跡の差異を数値として解釈する。そのため、複数の熟練オペレータによる作業で、建設機械の作業装置の動き、油圧圧力変化やレバー操作量などを計測し、解析を行った。

(b) 建設機械の自動制御技術

作業目標（設計）と現況（地形）の3次元情報を用いて、ロボット建設機械の作業装置の動作の計画を自動生成する制御アルゴリズムを、上記のオペレータのデータを参考として開発した。また、作業装置の位置や機械の姿勢等をリアルタイムに計測し、制御する装置を開発した。

①内界センサ

内界センサとしては、バケットの位置・姿勢を把握するものである。

当初、バケット、アーム、ブームの関節角度計測のために、純正オプションのポテンシオメータを用いた。しかし、ノイズにより計測値が分散してしまうことから、これをある程度押さえるフィルタに0.2～0.33秒を要することとなり、位置のPID制御の場合では、計測値のふらつきによる振動が問題となった。

このため、ロータリエンコーダを追加し、精度が大幅に改善され、計測値のふらつきによる大きな振動は見られなくなった。

この他に、GPSの効かない屋内実験と、表示のための下部走行体と上部旋回体の相対位置把握のために、旋回センサがある。耐久性のあるポテンシオメータと検証用の室内用高精度のものを実装している。

②電子油圧制御コンポーネント

軌跡計画に追従する、位置のPID制御で油の圧縮性を省いた1型2次系に簡略化し、補償器はFF型2自由度としている。シミュレーションで調整しており、電磁比例弁の油圧系では難しいと予想されるが、この確認には意味があると考えていた。ポテンシオメータの場合では、振動を抑えられなかったが、計測したケース(空中動作の自動追尾TSによる1Hzサンプリング)では、軌跡計画に対する追従性は10cmに収まっていた。ロータリエンコーダでは、通常の使用に問題ないと考えている。

③動作計画コンポーネント

どのように作業を自律で行うか、計画を行い、指令値を出すコンピュータのコンポーネントである。開発環境は、MATLAB/SIMLINK及び一部Cで、速度は100Hzで動作するものとしている。詳細については本機関誌「油圧ショベルによる自律掘削と動作計画に関する研究」をご覧ください。

(4) プロトタイプシステムによる検証

以上のまとめとして、油圧ショベルによる掘削・積込の機械土工の作業を対象として、プロトタイプシステムで構内模擬現場試験を行い、機能の検証を行った(写真-2)。

積込はクローラダンプに行い、クローラダンプにぶ



写真-2 掘削積込状況

つけないため等の確実な動作のために、サイクルタイムは、荒掘掘削で40秒、仕上げ掘削で50秒を要することになったが、仕上げ精度は、10cmに収まり、一定の成果を得たものと考えている。

ここでの課題は、スムーズな動作とサイクルタイムの短縮、掬いきれない土砂がバケットからこぼれる対処等であった。

4. おわりに

本研究開発では、代表的な汎用建設機械である油圧ショベルについて、IT・RTをIT施工システムとして構成し、基盤となる要素技術の開発に取組み、自律化された作業を具現化することを可能とした。

今後は、土質地盤条件、作業内容・形状・範囲等への条件対応、例えば多様な地盤条件に適応するシステムを実現する研究を更に進める必要がある。また、ここで可能性の見てきた自律機能を活用する、操作支援や施工方法への取組も必要となる。

謝辞：本研究を実施するにあたり国土交通省、ロボット等によるIT施工システム研究委員会(委員長:筑波大学油田教授)、東京大学人工物工学研究センター浅間研究室、(社)日本建設機械化協会、(財)先端建設技術センター、土木学会建設用ロボット委員会、建設無人化施工協会をはじめ多くの方々にご指導頂きました。お礼申し上げます。また実験にご協力いただいた方々に感謝いたします。

JICMA

【筆者紹介】



山元 弘(やまもと ひろし)
(独)土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主席研究員



茂木 正晴(もてぎ まさはる)
(独)土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
主任研究員



大槻 崇(おおつき たかし)
(独)土木研究所
技術推進本部 先端技術チーム
研究員