

## 49. 建設機械の自律走行に関する研究

大成建設㈱；宮崎 裕道、\*近藤 高弘

### 1. はじめに

建設を取り巻く環境は益々厳しく、施工技術の高度化・安全性・品質の向上・生産性に加え環境への対応などが要求されている。その中で施工方法においても従来工法にとって変わる新技術や、新たな施工機械の提案などがなされている。しかし現実には、これらの提案を有効的かつ機能的にまとめ上げられた完全な総合的施工システムは実現していない。この様な総合施工システムを実現するためにはまだまだ多くの問題を解決しなければならない。

これらの取り組みの一部として今回、建設機械の自律走行に関する研究を行った。自動化機械で施工



写真1 自律走行実験用クローラショベル

する場合、建設機械のみが自動化されても実現しない。施工条件にあった制御・管理などの条件が複雑にからみ合い総合的に運用管理されてはじめて建設機械の自動化が可能になるものである。

研究の目的は建設機械を無人化するために必要な要素技術の研究を行うことであり、実機の建設機械を自律走行させることを目標とした。

写真1に研究で使用した建設機械を示す。

### 2. 研究目標

実機の建設機械を自律走行させるために必要な研究要素として以下の研究内容を設定した。

- ①. 機械の現在位置・姿勢を感知する技術の研究
- ②. 建設機械の自律走行を制御するためのアルゴリズムの研究
- ③. 緊急時に対応した建設機械の自己判断機能の研究
- ④. 各装置を有機的に結合し暴走などを未然に阻止するための電子制御技術の研究
- ⑤. 上記研究内容をフィールド走行実験で検証する。

建設機械には3 ton 級クローラショベルの実機を使用し、実験フィールドは約50m四方の平地をX、Yの直交座標系に設定した。

実験は上記の研究目標を実現するために以下の三段階に設定した。

第一段階. 機械の位置・姿勢検知のための研究として慣性航法に関する実験

第二段階. 建設機械を制御するための各種搭載装置間の機能確認と無線による操作実験

第三段階. 前段階を総合した障害物回避を伴う自律走行アルゴリズムによる走行実験

### 3. 研究概要

建設機械を自律走行させる研究では、まず機械自らの位置と姿勢を検知する方法として、自律走行機械の活動エリアを限定せず構造物の内部でも位置・姿勢が検知でき、かつ初期値のみの入力で位置・姿勢が把握できる慣性航法を選択した。さらに自律走行機械では各種装置間での情報交換にデータ蓄積型のネットワークシステムを構築し円滑な装置間通信を実現させた。また事前に計画された路線を走行していてもルート上に障害が発生することを想定し回避機能を持った自律走行機械の研究を行った。

### 4. 研究内容

#### 4-1. 慣性航法

慣性航法の原理は図4-1. 1に示すように、いま点0 (X、Y) から出発して点2 (X 2、Y 2) に至る過程を慣性航法で求める場合、点0から点1へ向かう速度ベクトルUと、この間の移動に要する微小時間との積 (距離=速度\*時間) から点1の座標 (X 1、Y 1) を求めることができる。さらに点1から点2へは求めた (X 1、Y 1) を初期値として同様に速度ベクトルVと微小時間の積で座標値 (X 2、Y 2) が求まる。

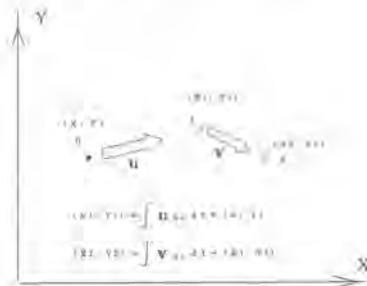


図4-1. 1 慣性航法の原理

このように慣性航法における位置・姿勢の検知は外部からの位置情報を受信することなく、自ら位置と姿勢を把握できる特徴をもっている。しかも姿勢の把握ができて機械が現在どの方向を向いていて、次に左右どちらにどの位向けば良いかを知る有力な情報としても活用できる。しかし慣性航法には時間とともに位置精度が劣化するという欠点がある。

本研究では数十分間使用して誤差を最小に抑える手段と、簡易な装置でも高精度の装置と同等な性能を引き出す方法を実験データを解析し導き出すこととした。

実験での走行座標の精度を確認する手段として、自動追尾式トータルステーションで建設機械の走行軌跡をリアルタイムに計測して慣性航法データと比較する評価方法をとった。

慣性航法の実験は以下の三段階で行った。

第一段階：三軸光ファイバージャイロを利用した慣性航法の実験

第二段階：三軸リングレーザジャイロを利用した慣性航法の実験

第三段階：実験データをもとに一軸光ファイバージャイロを想定した慣性航法の解析

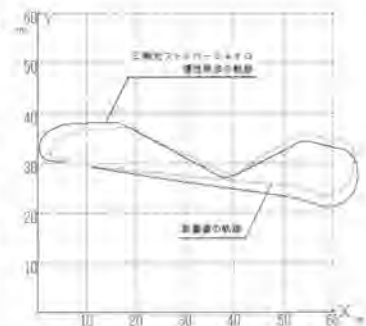


図4-1-1. 1 三軸光ファイバージャイロ慣性航法の軌跡

#### 4-1-1. 三軸光ファイバージャイロ慣性航法実験

光ファイバージャイロは相対方位角の検出を行うもので、真北方位の検出はできない。そこで地磁気

方位センサーで絶対方位の補正処理を行うことで対応した。また建設機械の傾斜情報にはサーボ加速度計を用い、走行距離情報は建設機械の後部に回転ドラム式走行距離計を設置して距離情報を得た。

実験結果は図4-1-1. 1に示すように測量値の軌跡と慣性航法の軌跡を比較するとずれが生じている。これは光ファイバージャイロが絶対角で検出できないため地磁気センサーから補正した時の誤差が影響している。

#### 4-1-2. 三軸リングレーザジャイロ慣性航法実験

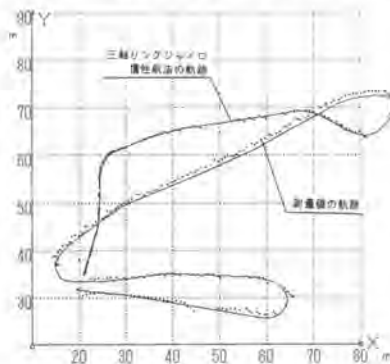


図4-1-2. 1 三軸リングレーザジャイロ慣性航法の軌跡

三軸リングレーザジャイロは高精度に絶対方位角を検出する機能を持っている。走行距離の検出は左右のクローラの回転を検出するように改良した。

実験結果は図4-1-2. 1に示すように走行距離の検出方法の改良と、走行時の方位角を常に精度の高い絶対方位で検出できるため、きわめて精度の高い慣性航法結果を得ることができた。

#### 4-1-3. 一軸光ファイバージャイロを想定した慣性航法のシミュレーション解析

慣性航法で使用するジャイロは三軸のリングレーザジャイロがもっとも理想的であるが、実用性を考慮して安価な一軸光ファイバージャイロを用いることで慣性航法を経済的に実現できるかのシミュレーション解析を行った。精度確保のため絶対方位を検知する手段としての地磁気センサーを全周方位の地磁気の分布などを解析して地磁気精度の向上をはかり対応した。

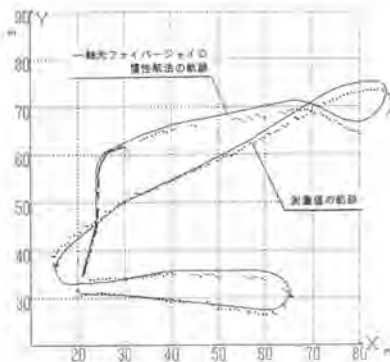


図4-1-3. 1 一軸光ファイバージャイロ慣性航法の軌跡

慣性航法のシミュレーション解析の結果を図4-1-3. 1に示すように、実用上満足いく結果を得ることができた。自律走行での位置および姿勢の検知にはこの方式の慣性航法を採用して行っている。

#### 4-2. 建設機械のサーボ化による無線操作

実機は人間が直接レバーを操作して運転できる機構になっている。目的である自律走行では、この人間が直接行っている操作を電気信号で操作できるように改良する必要がある。それに伴い、建設機械の動作をモニターすることも必要のため、操作系を以下のように改良した。

・操作系の電気信号による制御可能な箇所

〔 キースイッチ、アクセル、シフト（前後）、シフト（速度）、クラッチ、ブレーキ、  
ステアリング、バケットリフト、バケットダンプ 〕

・状態をモニターするための計測信号取り込み箇所

〔 エンジン回転数、クローラ回転数、バケット負荷、対地速度、バッテリー電圧、  
各種油圧シリンダーのストローク長、シリンダー動作圧力の検出 〕

これらの操作信号および計測信号のモニターとして制御用のCPUを建設機械に設置して無線操縦でその動作を確認した。

#### 4-2-1. 建設機械の制御系システムの構成

実機を自律走行させるためには建設機械内部で行う各処理システムを有機的に結合する必要がある。そのため自律走行に必要な機能を各サブシステムに分割して全体をネットワークで結びつける。しかし各サブシステムの形態が異なるものを専用のネットワークで構築しようとする、ハード・ソフト共に膨大なコストと時間がかかる。従ってサブシステム間の通信にはシリアル通信で結合できるデータ蓄積型のネットワークシステム（SHUB）を開発した。

SHUBは、各サブシステムで計測したデータや、別のシステムに必要な情報をこのSHUBのメモリーに書き込んでおき、その情報を必要とする別のシステムが自由に読み出すことができる通信ネットワークシステムである。

この通信システムを用いて、例えば走行中の建設機械の現在位置を慣性航法で求めた座標値をSHUBに書き込むとする。建設機械制御用のサブシステムは、あとどれだけどのように操作させたら目標に達するかデータをSHUBに書き込まれている慣性座標データを読むことで知ることができる。

図4-2-1. 1に示すように建設機械の制御システムは自律走行を前提とした4つのサブシステムをSHUBに接続して構成されている。



図4-2-1. 1 自律走行のシステム構成

通信STD：外部との通信および内部通信の分配を制御する。

制御STD：建設機械の操作部（アクセル、シフト等）を指示値通りに制御する。

監視PC：障害物検知と建設機械をどのように操作するかを指示値を制御する。

慣性PC：自律走行の計画路線の指示と慣性航法による座標処理を制御する。

SHUB：各サブシステム間のデータ蓄積型通信ネットワークシステム。

#### 4-3. 自律走行

自律走行とは、無線などで機械を遠隔操作するのとは異なり機械自らの判断で走行するシステムである。そのため遠隔操作に頼らず機能するというメリットがある。このようなシステムに必要な機能を以下に示す。

- ①. 機械が自ら自分の位置と姿勢を検知する能力。
- ②. 操作・制御手順を自ら決定する能力。
- ③. 周囲の状況を判断して、制御手順を変更できる能力。

無線操作などの遠隔操縦の機械では①～③までを人間が行っていた。自律走行式機械ではこの人間が行っていた部分を機械に代行させる必要がある。

#### 4-3-1. 走行路の決定方法

計画路線の作成にあたっては、実際の現地座標を何点もおさえ計画走行路を示すのは最良の方法とはいえない。走行点が多くなるに従って入力ミスが増えるからである。



図4-3-1. 1 計画路線曲線

普段、人が自動車を運転しているとき、この点とあの点を通る、というようには運転しない。あの角を曲がって次の交差点を右に行くといったように、大まかに走行路を決めている。

図4-3-1. 1に示すように自律走行における走行路の決定においても同様で、大まかに通過しなければならない点を数点入力することで、あとは全体に連続した滑らかな曲線を描くような走行路を求めるようにしてある。

この走行路曲線を利用すると建設機械は自ら前進するのか後進するのかを判断することができる。

通過点①～④までは滑らかな曲線を描いているが、通過点④～⑤にかけては急に曲線が折り返している。このような折り返し点がある場合、前進から後進へと切り替える判断として利用することができる。

走行時の操作方法の決定には求めたこの滑らかな走行曲線を利用するが、実際のクローラ型建設機械の操作を考えると、このような曲線では利用が難しくなる。したがって図4-3-1. 2に示すように走行曲線を分割し、幾つかの直線で構成する線分に変換する。

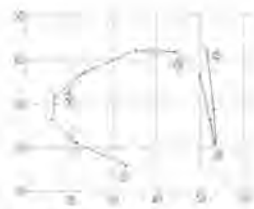


図4-3-1. 2 直線分割した路線

#### 4-3-2. 自律走行時の操作方法

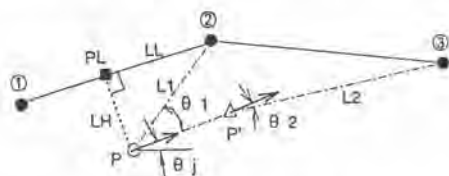


図4-3-2. 1 操作概念

走行時の操作方法は走行路全体をとらえるのではなく、分割した直線で現在走行に利用している線分と次の走行に必要な線分の情報で構成する。

操作概念は図4-3-2. 1に示すように、計画走行路線①②③が決定されていると仮定して、今現在の建設機械の位置をP、機械の進行方向角を $\theta_j$ とする。点Pを線分①②上に投影した点をPLとして

建設機械進行角が $\theta_j$ でそのまま進行した場合、点Pの投影点PLが点②を通過するときの点Pの予想点をP'とする。線分LHは計画線①②からの離れを表す。

線分L1は建設機械の現在位置から目標点②までの直線距離を表す。点Pにいる建設機械は目標点②

に向かうには $\theta$  1左旋回してL 1進むことで点②を通過できる。

しかし点②を通過しないで点③に向かうには現在の状態で進み点P Lが点②を通過した時点で $\theta$  2だけ右旋回しL 2だけ進めばよいことになる。

これらのことから建設機械の制御を行う場合、計画走行路線①②線上を走行中の建設機械は線分①②の離れおよび到達目標点②までの距離L 1と旋回角 $\theta$  1の情報を確保すればよいことになる。

また計画走行路線を変更するには、点Pの投影点P Lが点②に重なったときに現在走行中の路線①②から路線②③に切り替え、新たな点④を追加して同様の処理を行えばよい。

このような操作方法により、計画走行線分からの許容離れを設定することで走行路線をある設定範囲以内の精度で走行させることが可能となる。

また、走行時前方に障害物を検知した場合、前記の走行操作方法に関係なく独自に障害物を回避するように迂回動作を実行する機能を有し、障害物迂回後はまたもとの計画路線に戻ることができる。

#### 4-3-3. 自律走行実験の結果

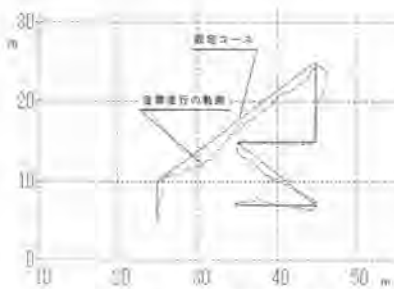


図4-3-3. 1 自律走行軌跡

リング操作を行って軌道修正している。

このように走行実験から自律走行のアルゴリズムにより行動が大きく変化することが判明した。

自律走行軌跡を図4-3-3. 1に示す。このような自律式走行車輛の実験を行うと、通常のパターン走行やラジコン操作等に見られない自律走行独自の動きが発見できる。

ある設定したコースを走行させる場合、コースを大きく外れても自分自身で一生懸命もとのコースに戻ろうといろいろ動きまわったりもする。また直線を走行する場合でも、人が車を運転している時と同じように真っ直ぐな道でもたえず微妙なステア

#### 5. おわりに

建設機械自動化のための要素技術を究明するため、実機による自律走行式の建設機械をターゲットに研究してきた。この結果実機を利用したことで、地道ではあるが自律走行という先端的な部分以外に複数のシステムをいかにして調和あるものにするかといった実務的な技術や、実験データから得られた結果を効率よくシステムに還元する手法などの技術が研究を行う上で特に重要であった。

自律走行式の機械という考えかたは今後利用され発展していく技術であると確信するが、この技術を確立する上での当面の課題は、安全性、現地形の認識、複数台による協調作業などである。今後多くの方々のアドバイスをお願いしたい。