

29. 建設車両自動運転システムの開発(第2報) ～無人走行のための要素技術の開発～

(株)間組：高山 修・杉浦 仁志

齊藤 宏明・滝澤 幸信

東京航空計器(株)：塙 守智

システムアーキテクト&ネットワーク(株)：荒澤 弘樹

1. まえがき

建設工事における各種運搬作業は、工事工程の中で最も重要かつ中心的な作業である。そこで我々は、この各種運搬作業に注目し、この部分を無人化することによって人手不足の解消や施工の合理化につなげたいと考えている。前報では、RCDダム施工を当面の対象として取り上げ、これをモデル化して段階的に無人化を推進していく図-1に示す様なイメージの建設車両自動運搬システム(HIVACS)構想を紹介し、図-2に示す様な4つのCPUを搭載した運搬ロボットの技術開発の進め方について報告した。本報では、この構想の第1段階実現を目指して進めている実験車を使った具体的な自動運転制御技術(メインCPU)、車両位置・方位計測技術(サブCPU1)、前方障害物検知技術(サブCPU2)等の開発状況について報告する。

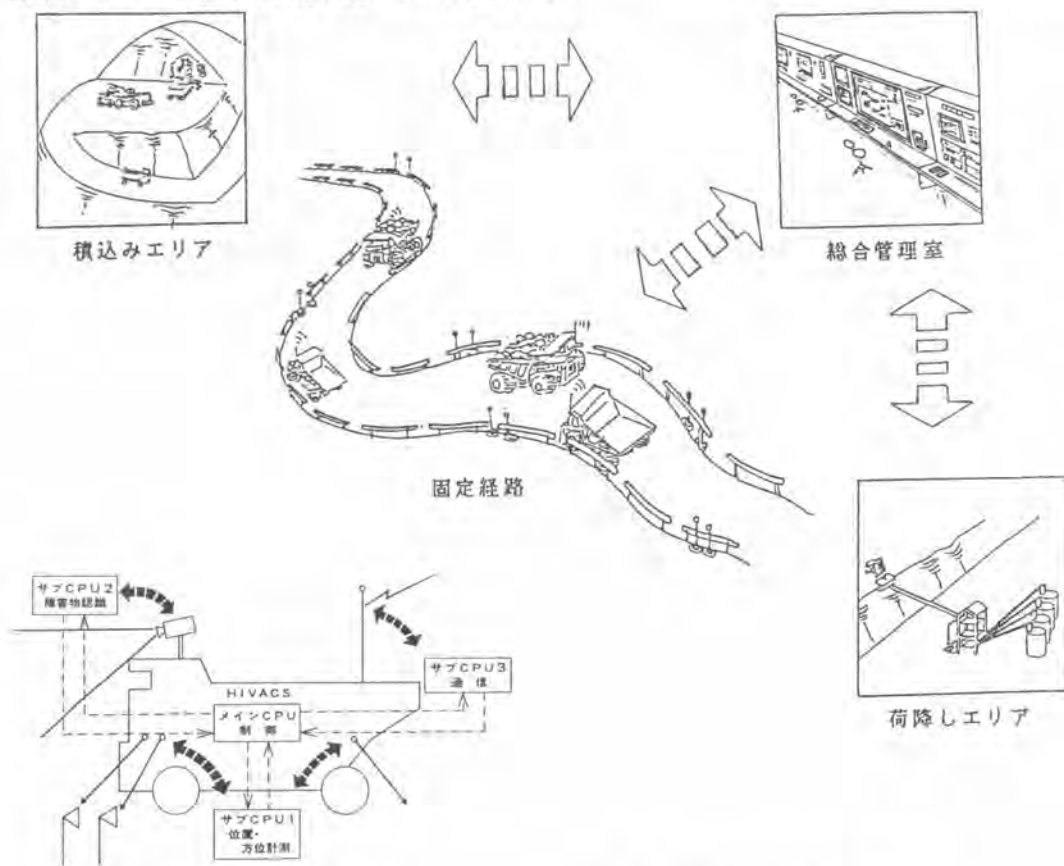


図-1 HIVACS(ハイヴックス)構想図

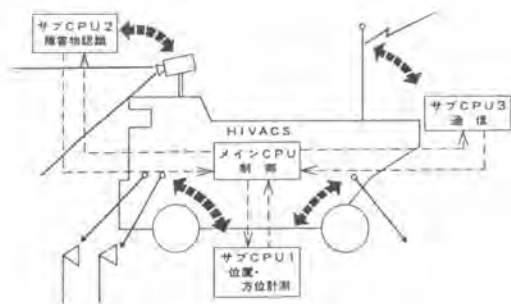


図-2 運搬ロボットの基本機能

2. 自動運転制御技術（メインCPU）

運搬車両を無人走行させるためには、予め走行経路を車両に記憶させておきアクセル、ブレーキ、ステアリング（ハンドル）、シフトの運転4要素を各専用のアクチュエータにより、その経路に添って蛇行幅が出来るだけ小さくなるように、しかも適切な速度で自動制御しながら目的地まで自律的に無人運転させる方法が考えられる。

具体的には、「①走行中の車両の位置・方位を計測し、②これをメインCPUに情報として送信、③このデータと予定経路との比較を行い、④メインCPUが運転用アクチュエータ類へ適正な制御のための命令を行う」といった①～④の工程の繰り返しによって運転制御を行うものである。

図-3に、現在の自動運転制御のシステムフロー図を示す。実際の無人走行はまず走行前に予定ルートの位置データ（X, Y）をメインのCPUに入力する。車両が走行を始めるとメインCPUは車両位置方位計測システムから走行位置（X, Y）、方位（ θ ）、速度（V）、角速度（ ω ）のデータを取得する。次に予定ルートとの比較を行った後、速度、角速度さらにステアリング切り角 τ の Δt 秒後の目標値を演算する。そしてこの演算結果に基づいてスピード及びステアリング制御を行っていく。これが制御の1ループ（ Δt 秒）であり、この繰り返しによって自律的に無人走行を続けるものである。



図-3 運転制御システムフロー図

写真-1に実験車によるテストコースでの無人走行試験状況を、図-4にそのシステム構成図を示す。実験は、市販のワゴン車を改造し使用している。現在この実験車には、それぞれメインCPU、サブCPU1、サブCPU2として3台のパソコンを搭載している。

これまでの実験結果から走行速度が10km/h程度の直線走行においては、 ± 70 cm程度の蛇行幅内の無人走行を確認している。



写真-1 実験車

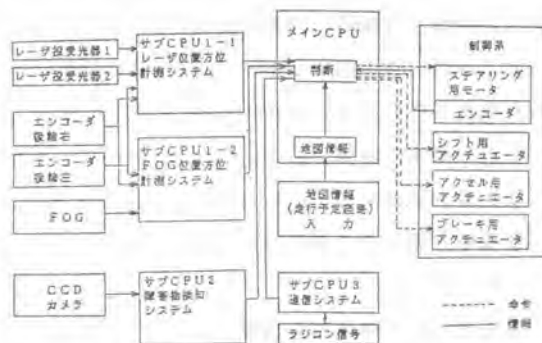


図-4 実験車のシステム構成図

3. 車両位置・方位計測技術（サブCPU1）

ダム現場のような屋外環境に適用可能な走行中の車両位置・方位計測装置としては、車輪の回転数をカウントし位置・方位を計算で求める内界センサによる方法（これをデッドレコニング法と呼んで

いる)と、例えばレーザーとコーナ・キューブ(全方位反射ミラーの一種)を利用した三角測量により計測する外界センサによる方法等を組み合わせたシステムが考えられる。つまり、数kmに及ぶ長距離走行においても累積誤差が生じないようにエンコーダによる自立計測をレーザーとコーナ・キューブを使った援助計測で逐次補正していくシステムが必要である。

具体的な例を図-5に示す。自立計測系は、車両の左右後輪に取り付けたエンコーダおよび後輪中央部に設置した光ファイバージャイロ(FOG)により走行中の位置と方位を算出する。援助計測系は、走行経路の道路の片側に10~50mごとに2個1組で設置したコーナ・キューブおよび車体に取り付けたレーザー投受光器(LPU)により、自立計測系で算出した位置・方位データを逐次補正していくものである。

これまでの実験結果から現状の位置方位システムの精度は、位置検出精度:±30cm以内(±20cm以内)、方位検出精度:±2deg以内(±1deg以内)となっている。なお、()内の値は目標値である。



写真-2 実験車に取り付けた各種センサー

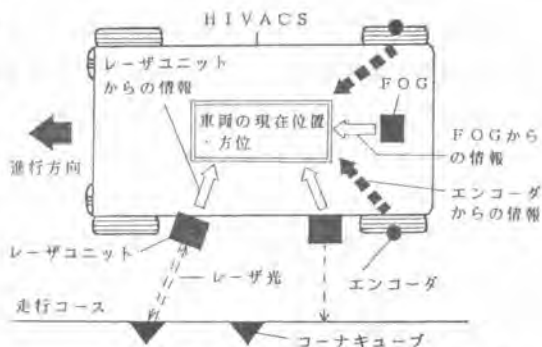


図-5 実験車の位置・方位計測システム

4. 前方障害物検知技術(サブCPU2)

車両を屋外環境で無人走行させるには、走行路上の前方にある障害物をなんらかの方法で認識しさらに車両を自律的に回避あるいは停止させる安全対策が必要不可欠である。

ところで、ダム現場における走行経路の環境は一般の公道とは異なり、以下に示すように限定された環境条件にあると考えられる。

- ① 走行環境が既知である。
- ② 比較的低速かつ一定した速度での走行である。
- ③ 現場作業員や工事用車両以外の不特定多数の人間や車両が走行経路内に進入してくることが少ない。

したがって、障害物を認識するシステムに関しては、当面は前方の侵入者(現場作業員)および車両、対面交通の場合のスレ違い車両の3つについて認識できれば良いと考えられる。なお、先行する車両やスレ違い時の他車両の認識は、将来的には車両間の通信による相互位置情報の交換や、車両側面に設置した光リミットセンサ等の他のセンサによっても可能であるため高精度の相対的な距離計測の必要性は少ないと考えられる。

障害物を認識する技術としては、いくつかの方法があり、その1つとして車両からレーザーや超音波

等を発射し障害物で反射させ認識する方法があるが、実際の走行路にはガードレールや標識等が設置してある場合が多いためカーブ走行の際に、これらに反射して誤認識し易い等の点で識別能力が低い。そこで、前述の環境条件を考慮し、しかも道路周辺に付帯設備等があっても識別できる方法としてCCDカメラを用いたカラー画像処理による前方障害物認識システムを採用した。これは写真-3の様に実験車の運転席の横にCCDカメラを搭載し、前方の画像をパソコンで処理して走行路上の作業員の認識を行うものである。作業員の認識方法は、作業員が共通して着用しているヘルメットに注目し、そのヘルメットの色を画像処理によって抽出することによって作業員として認識するもので、ヘルメットの色は通常建設現場で使用している黄色のものをそのまま使用している。さらに、幅広い気象条件でのヘルメット抽出に向けて色抽出だけでなくヘルメットの形状認識や面積認識も取り入れたアルゴリズムを用い、また処理速度のアップのためトランスペアレントボードを用いたシステムを開発中である。しかし、現状では日照条件や背景等により抽出能力が不安定になることや画像処理に時間がかかり即時性がない等の解決すべき点が多い。

したがって、将来的には前述した方法などを組み合わせるにより信頼性を向上させて使用する必要があると考えている。



写真-3 実験車に取り付けたCCDカメラ

5. あとがき

本システムを完成させるためには、これまで説明してきた技術以外に複数台の運搬ロボットや他の重機との協調作業において、各車両間やコントロールセンター（総合管理室）間での相互通信技術が必要である。つまり、複数台の運搬ロボットを合理的に稼働させるためには、個々のロボットの現在位置を総合管理装置が把握し、この装置が次の行動を判断指示する必要がある。

この通信手段としては、ミリ波や超音波等の微弱電波による無線通信が考えられるが、地形その他の原因により不感地帯が発生し、通信状態が不安定になることが考えられる。その場合はローカルアンテナを適宜設置して、その間を有線とした有線、無線の組合せ方式も考えられる。

これらを含め今後の展開として、以下のような課題が挙げられる。

- ①無人走行のスピードアップ（40km/h程度）
- ②位置・方位計測システムの性能アップ
- ③障害物認識システムの性能アップ
- ④障害物回避技術の確立
- ⑤相互通信技術（サブCPU3）の開発

以上の課題の解決と共に、今後は実験車を用いたダム現場でのテスト走行を実施し、運搬ロボット実現のための各要素技術を確立していきたいと考えている。

最後に、本研究は筑波大学知能ロボット研究室、油田助教授の御指導を受けて開発を進めていることを付記しておく。