

# ホイールローダによる積み込み作業を対象とした自律作業システム

皿 田 滋

ホイールローダによる砂利の積み込み作業を対象として、操作員による関与を一切必要としない自律システムの開発を行っている。中型の実機をベースにした実験機とダンプトラックにより砂利堆積からのすくい取り・ダンプへの積み込みを実現した。堆積やダンプの位置などの環境情報は作業システムのセンサー系により取得し、それに基づいて作業計画を作成し、動作制御機能により自律的に作業を遂行した。本文においては実機ベースの実験機による開発の概要を述べる。

キーワード：自律作業，ホイールローダ，積み込み作業，自動化，ステレオビジョン，LRF

## 1. はじめに

ホイールローダ（フロントエンドローダ：以下ローダ）は露天鉱山や採石場での積み込み作業用の機器として最もよく用いられている機器のひとつであり、通常はダンプトラックとの組み合わせで用いられることが多い。ダンプトラックの自動化については、すでに日常的な操業に応用される水準に達しているが<sup>1) 2)</sup>、ローダについては、採石場での使用を目的とした一部自動化の開発例<sup>3)</sup>があるものの完全な自動化はまだまだ達成されていない。

建設や鉱業などのいわゆる非製造業の作業は、作業対象が不定形の不定形物体の集積であり、それらの形状と位置は作業の進展に応じて刻々と変化することが大きな特徴である。このような作業を遂行するシステムには変化する環境の中で適切な動作を決定する機能である「自律性」が必須であり、システムの作業遂行能力は「自律性」の程度に大きく依存する。

筆者らは自律作業システム開発の一環としてローダによる積み込み作業を対象として、操作員の関与が一切不要な自律作業システムの開発を目指した研究を実施してきた。これまで小型実験模型を用いた実験室内での研究<sup>4) ~ 6)</sup>を行ってきたが、平成 16 年度からは中型の実機をベースとした実験機「山祇（やまづみ）4号」を用いた屋外実験を開始し、実験機による一連の積み込み作業を実現した。本文においては実機ベースの実験機による開発の概要を述べる。

## 2. 実験機「山祇 4号」のシステム構成

### (1) 対象とする積み込み作業

ホイールローダとダンプトラックの組み合わせによる積み込み作業では V シェープ方式が多く用いられているので、本研究もこの方式を対象とした。図-1 に示すようにローダは堆積とダンプトラックの間を途中に切り返しを含む V 字型の経路を往復走行する。堆積からのすくい取り位置とダンプ荷台への積み込み位置は作業の進展に応じて変化する。

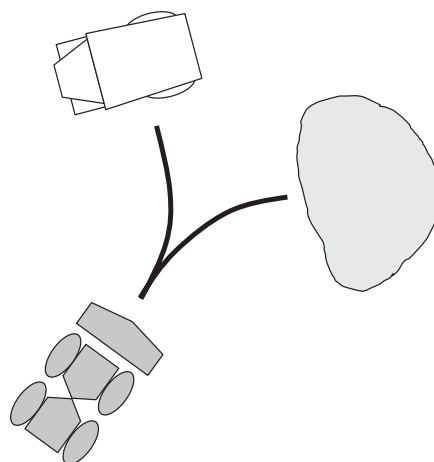


図-1 V シェープ積み込み方式

### (2) ホイールローダの機構と制御系の構成

図-2 に実験機「山祇 4号」を示す。ベースになったローダは通常の中型ローダである。ベースマシンの全長は約 7m、車体重量は約 7 トン、バケット容量は

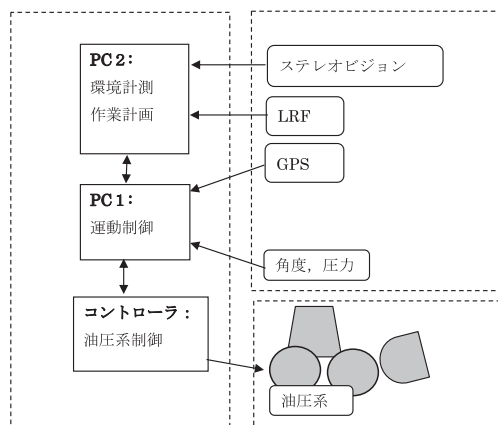


図一 実験機「山祇4号」

1.4 m<sup>3</sup>である。

ベースマシンの駆動操作系にパイロットバルブ等を付加し、電算機による制御が可能となるように改造を施した。バケットアームおよびバケット傾斜、ステアリングは油圧シリンダによって駆動され、また、走行は走行用の油圧モータによって駆動されている。これらの油圧アクチュエータにパイロット弁を介してコントローラから制御可能とした。ローダ全体の動力はエンジンから供給されており、供給動力はエンジン回転数を制御することによって調整するが、電動モータによってエンジン回転数を制御するように改造し、コントローラによって供給動力の調整を可能とした。制動装置はブレーキペダルを電動直動機構によってブレーキペダルを押し下げることにより制動の調整を行うようにした。

山祇4号には3台の制御用電算機が搭載されている。1台はコントローラであり、油圧シリンダ等の油圧機器を駆動する。このほかに2台のPCが搭載されており、1台は運動制御用の「PC1」、もう1台は環境計測と作業計画を担う「PC2」である。コントローラとPC1、PC2はCANとイーサネットにより結合されており、必要に応じて情報の送受信を行っている。全体



図一 3 制御系の構成

の統括と作業段階の遷移はPC2によって行われ、各作業段階に応じた運動制御はPC1によって行われる。PC1からの動作指示に従いコントローラは各油圧シリンダ等を作動させる。図一3に制御系の概略図を示す。以下にセンサー系の構成を述べる。

### (3) センサー系

センサー系は運動制御用と環境計測用の2種類に大別される。運動制御用はローダの各部の位置、角度、速度、圧力などを計測し、環境計測用はローダの位置、堆積形状、ダンプ位置などを計測するためのセンサーである。

運動制御用センサーは車輪回転軸、車体屈曲軸、バケットアーム回転軸、バケットチルト回転軸に取り付けた回転角度センサーおよび油圧アクチュエータに取り付けた油圧センサーである。前者の回転角度センサーによってローダ各部の姿勢および運動速度等を検出する。また、後者の圧力センサーによって、主としてすくい取り動作においてバケットが受ける堆積物からの反力を検出する。

環境計測用センサーはGPS、ステレオビジョンシステム、レーザーレンジファインダー(LRF)である。GPSによる位置検出では実験場に固定したGPS基準局を用いたRTK-GPSにより±2cm程度の精度で位置計測が可能である。また、山祇4号には2台のGPS受信機を搭載し、位置および車体方向の検出を行っている。

ステレオビジョンシステムは堆積の位置および形状の計測を目的としており、2台のCCDカメラは屋外設置用の防護箱に収められ、GPSアンテナと同様、車体後部キャノピー上部に固定している。

LRFは車体の側面に2台設置され、主として積み込み動作において山祇4号がダンプへ接近した際に衝突を防止するため、ダンプ荷台位置の検出に用いている。装備したLRFはレーザービームを回転走査することにより、ビーム走査面内での対象物の2次元形状を取得することができる形式のものである。LRFはビーム走査面が地面に垂直になる角度で取り付けられたので、車体前方にある対象物の垂直断面形状が計測可能である。

### (4) 実験用ダンプトラック

実験に用いたダンプトラックは通常の10tダンプトラックであり、操作機構には改造を施していない。運転は運転員によって行うが、位置と方向の検出を可能とするため、図一4に示すように山祇4号と同じ2台のGPSが装備されている。また、運転席にはPC

が装備されており、GPS データに基づいて位置と方向を算出するとともに、無線 LAN を経由して山祇 4 号とデータの送受を行うことができる。山祇 4 号からの要求によってダンプの位置と方向を送信する。



図—4 実験用ダンプトラック

### 3. 環境認識と運動制御

#### (1) 堆積形状計測とモデル化

すくい取り位置は堆積の 3 次元形状と位置に基づいて決定する。堆積の形状は 2 台の CCD カメラによるステレオビジョンによって得られるが、2 枚の画像から 3 次元形状を構成するためには相関法を用いた。破碎岩石の集積である堆積の表面はランダムな模様になっており、相関法によってきわめて良好な 3 次元形状が構成できた。ステレオビジョンによって得られた 3 次元形状は柱状要素モデル<sup>4)</sup>に変換し、堆積の裾野輪郭の抽出と堆積重心位置の算出を行った。

#### (2) ダンプ位置検出

ダンプへの積み込みの際、ローダとダンプの距離はきわめて小さくなり、バケットはダンプの荷台上に進入するので衝突の可能性が高くなる。衝突の危険を回避するため LRF によってローダとダンプ荷台の相対位置の検出を行った。山祇 4 号には GPS による位置決めシステムが装備されているが、GPS による位置検出には時間遅れがあり、また、車体傾斜等によってアンテナ位置が移動し、位置検出に影響があるため、積み込み過程では LRF によるダンプ荷台検出位置に基づいて積み込み動作の制御を行った。

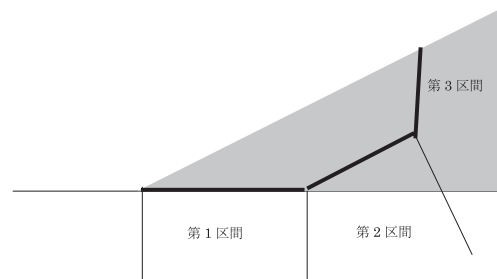
#### (3) 経路計画

経路計画において経路要素を組み合わせることで経路計画を行う方法を採用した<sup>6)</sup>。経路要素として直線と曲線の要素が必要であるが、曲線要素はローダがその曲線上を走行可能であり、また記述が単純であることが

望まれる。そのような性質をもつ曲線要素としてクロソイドにローダのステアリング方式の特性を考慮して修正を加えた対称擬似クロソイド (Symmetrical Pseudo-Clothoid: 以下, SPC) を考案した。

#### (4) すくい取りバケット制御

すくい取り過程ではバケットに大きな反力が発生するため、バケット進行方向を適切に制御する必要がある。すくい取りの際のバケット経路を図—5 に示すように 3 つの区間に分けた。第 1 区間ではバケット先端は地面に接して水平に貫入する。このときのバケット底板角度は水平である。ついで第 2 区間ではバケット先端は斜め上方に進行するとともにバケット角度も増加し上向きになる。第 3 区間はすくい取り動作を終了するためバケットを上方に移動して堆積から離脱するための動作である。第 1 区間から第 2 区間の移行はバケット荷重の水平分力と密接な関係がある車輪駆動用油圧モータの油圧計測値に基づいて決定した。第 2 区間ではバケットの上方への移動とバケット傾斜の増加の調和が、すくい取り効率にとってきわめて重要である。アーム角度の増加とチルト角度の増加を交互に行うことにより適切なバケット動作を実現した。第 3 区間へはバケット先端位置が所定の高さに達した時点で移行することとした。



図—5 すくい取り動作の区分

#### (5) 経路追従制御

実際には油圧系の動作誤差や遅れ、積荷状態の変化、地面とタイヤとの相互作用などにより計画経路から外れるので計画経路になるべく近づけるよう経路追従制御を行った。GPS によって得られた現在位置および方向と計画経路での位置・方向との間の誤差をローダに付随した車体座標系で表し、横方向の誤差と進行方向の誤差を操舵角速度にフィードバックした。操舵操作量は経路計画に基づくフィードフォワード項と誤差に基づくフィードバック項の和である。なお、経路追従制御では、進行方向の誤差についての修正は行っていない。この修正を行うためには車体速度の制御を



行う必要があるが車体は重量が大きいため制御性が悪く、有効な制御ができないからである。

#### 4. 実験方法と結果

##### (1) 実験方法

実験は産総研つくば北サイトの屋外実験場において行った。図一六に実験場全景を示す。実験用の堆積として砂利 100 m<sup>3</sup> を使用した。堆積物の粒度は 5～20 mm である。



図一六 屋外実験場

実験内容は 1 台のダンプを満載にするまでのサイクルを一連の作業として、次のような過程によって構成した。

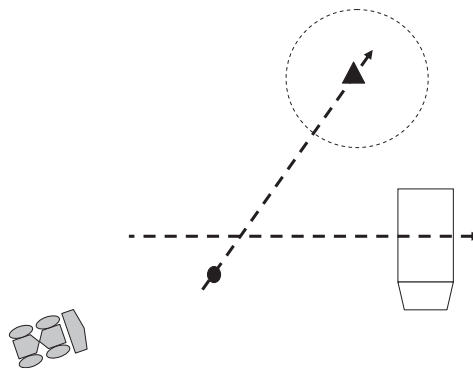
- ①初期位置から堆積撮像位置までの走行
- ②すくい取り開始点と積み込み開始点の決定
- ③すくい取り開始点までの走行
- ④すくい取り
- ⑤積み込み開始点までの走行
- ⑥積み込み
- ⑦すくい取り開始点までの走行
- ⑧④～⑦を 4 回繰り返す
- ⑨最後の積み込み終了後、初期位置へ戻る走行

なお、実験開始以前にシステムに対して与える情報は堆積の概略位置のみである。堆積の概略位置は実際の操業においては常に把握しているので、この位置をシステムに与えることは実用上、困難なことではないであろう。

なお、上記の①と②の過程の概要は次のとおりである。

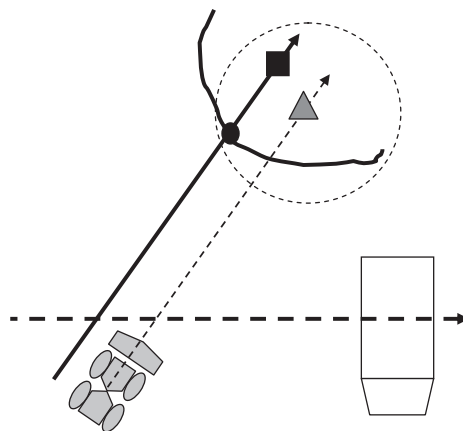
①初期位置から堆積撮像位置までの走行：この過程では堆積撮像位置の決定が最も重要な項目である。プログラムが開始するとローダは GPS によって自己位置および方向を取得する。ついでダンプと交信しダンプ

の位置・方向を取得する。図一七に示すように、すくい取りの方向をダンプに対して一定の角度（実験例では 45 度）に設定し、堆積概略位置（図中の▲）を通りこの方向の直線上に堆積形状撮像位置（図中の●）を設定する。概略位置との距離は 25 m に設定した。



図一七 すくい取り位置と積み込み位置の決定  
堆積撮像位置

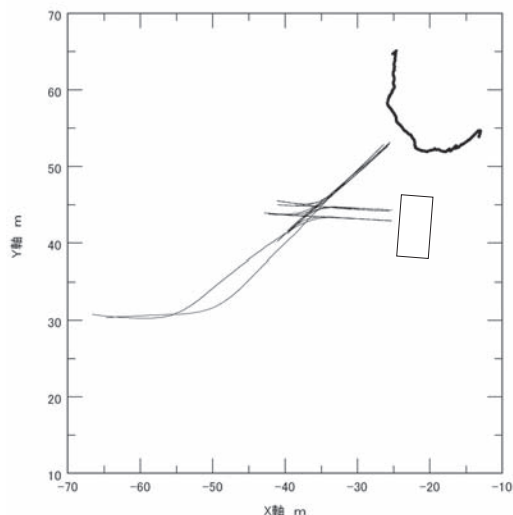
②すくい取り開始点と積み込み開始点の決定：この過程では、ローダは堆積形状撮像位置に移動し、ステレオビジョン画像から堆積の 3 次元形状を構成し、モデル化して堆積裾野輪郭線と堆積の重心位置の算出を行う。図一八に示すように、重心（図中の■）を通りすくい取り方向の直線と堆積裾野輪郭線との交点をすくい取り開始位置（図中の●）とする。なお、ダンプへの積み込み位置・方向はダンプの位置・方向に基づいて決定する。方向はダンプ荷台に対して直交する方向とし、積み込み位置は堆積物になるべく均等になるように 4 回の積み込み位置を前後左右にずらして設定した。



図一八 すくい取り位置と積み込み位置の決定  
すくい取り位置の決定

##### (2) 実験結果

図一九にローダの走行経路および堆積裾野輪郭線、



図一〇 走行経路

ダンプトラック位置を示す。なお、ローダの位置は車体中心の位置であり、バケット先端は約 2.5 m 前方である。初期位置 ( $X = -68$  m,  $Y = 31$  m) から発進し 4 回のすくい取りと積み込みを終了した後、初期位置に戻り作業を完了した。すくい取り位置および積み込み位置は堆積およびダンプトラック位置に基づいて決定されたが、適切な箇所に設定されている。図一〇に実験中の様子を示す。すくい取り、走行、積み込みの動作も順調に遂行されている。作業時間については、すくい取りから積み込みを経て次のすくい取りまでの 1 サイクルの所要時間は約 60 秒であった。なお、すくい取り位置と積み込み位置の直線距離は約 10 m である。

実規模実験において、作業環境の計測に基づいて作業計画を生成し実行することにより作業を自律的に遂行することができた。

## 5. おわりに

自律作業システム開発の一環として、ホイールローダによる積み込み作業を対象とした自律システム開発について述べた。これまでの研究成果を実機ベースの実験機に搭載し、一連のすくい取り作業を自律的に行う作業を実現した。システムの実証として、ダンプに満載となる 4 回の積み込みを実現した。

自律システムとして作業を遂行する機能は実証されたが、まだ、実機実験機による開発は緒についた段階である。荷台への積み込み位置、すくい取り量の均質



(a) すくい取り



(b) 積み込み

図一〇 実験結果

化など作業の質の向上も課題である。さらにより自律性を向上させることも課題である。引き続き研究を継続し、課題の解決に努めたい。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 宮下・川地・石井：無人ダンプトラックの走行システムの開発・運用，第 67 回石灰石鉱業大会予稿集，pp1-14 (2008)
- 2) <http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/profile/ad/tvcm/c06/index.html>
- 3) Sarata,S.: Research and Development on Unmanned Loading Operation by Wheel Loader, Proceedings of Aachen International Mining Symposium, pp249-258 (2002)
- 4) Sarata,S.: Model-based Task Planning for Loading Operation in Mining, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp439-445 (2001)
- 5) Sarata,S.,Osumi,H.,Kawai,Y.,Tomita,F.: Trajectory Arrangement based on Resistance Force and Shape of Pile at Scooping Motion Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation,pp.3488-3493 (2004)
- 6) Sarata,S.,Weeramhaeng,Y.,Tsubouchi,T.: V shape Path Generation for Loading Operation by Wheel Loader, Springer Tracts in Advanced Robotics Vol.25, pp591-602, Springer (2006)

### 【筆者紹介】

皿田 滋 (さらた しげる)  
(独) 産業技術総合研究所  
知能システム研究部門

