無人自律ホイールローダ「山祇4号」による すくい取り・積込作業

—作業制御と軌道制御—

小谷内 範 穂^{*1} 皿 田 滋^{*1} 菅 原 一 宏^{*2}

Scoop and Loading Execution by the Autonomous Wheel Loader “Yamazumi-4” —Task Control and Path Following Control—

Noriho Koyachi^{*1}, Shigeru Sarata^{*1} and Kazuhiro Sugawara^{*2}

Authors have been conducting the research on the unmanned pile loading operation by an automated wheel loader, “Yamazumi-4.” The system is a fully self-contained autonomous system. The unmanned wheel loader has various sensors to measure the self-position, the position of pile, and the position of the dump truck to be loaded. After path planning according to the positions of the pile, the truck, and loader itself, the path following control guarantees the total task completion consists of targeting the pile, scooping the pile, carrying a bucket of pile to the truck, loading the pile to the truck, and re-going to the pile. For the accurate positioning control, RTK GPS and Moving Base GPS systems are combined to the dead reckoning based on the virtual dual wheel vehicle model. The dead reckoning calculated by the wheel velocity and steering angles can not avoid accumulating the positioning errors. Although lower rate Moving Base RTK GPS system supplies more accurate global position and heading direction data, they contain time delay. Authors developed the algorithm to detect the time delay of the GPS data by comparing to the recent dead reckoning data and to re-calculate the current position and direction from GPS data. The path following feedback system is developed to follow the line part and the curve part in the planned path. The planned curve part consists of a pair of the symmetric psuedo clothoid curves. For the sure loading task, the path following control is switched to the bucket tip position control helped by the laser range finders. In the scooping task, bucket control is switched by the reaction force measured by the hydraulic pressure sensor. Totally the whole tasks were well controlled and completed.

Key Words: Wheel Loader, Unmanned Construction, Path Following Control, Task Control, GPS Positioning

1. は じ め に

ロボットの適用分野として建設土木現場が取り上げられてから久しく、ビル建設の自動化・ロボット化の研究開発は1990年代に盛んに行われた。また、雲仙普賢岳の噴火被災地の復旧のための無人化施工システムの開発が行われ、遠隔操作による作業の機械化は進められた。しかし土木現場は、工場の製造現場と比べると定型化が難しく汎用化や自律作業化は進んでいない。筆者らは、ホイールローダによる土砂搬送の自律システムの研究開発を小型模型を使って行ってきた[1]~[3]が、現在、実機(全長約6[m], 重量約6.75[t])をベースにした実験機「山祇4号」を用いてより実用化を目指した研究を行っている[4][5]。山祇4号を用いて視覚による堆積位置の自動検出、堆積のすくい取り、ダンプトラックまでのV字軌道走行、トラック荷台への積み込みの一連の作業を自律的に遂行する世界初とも言える実験に成功した。本論文では、作業制御と走行時の軌道追従制御について述べる。

2. ホイールローダの機構と制御系の構成

Fig. 1に山祇4号の外観写真を示す。

現在、山祇4号には内界センサとして、車輪回転軸、アーム回転軸、バケット回転軸、屈曲ステアリング軸にそれぞれエンコーダを、各油圧アクチュエータの出力を計測するための油圧計を装備している。外界センサとしてGPSとレーザレンジファインダ(LRF)、ステレオカメラを装備している。制御系は、油圧バルブ制御のための組込用マイコンシステムと位置速度軌道制御用PC1、そして視覚センサ処理兼経路計画用PC2からなり、軌道制御PCと組込用マイコンとはCANで、軌道制御PC

原稿受付 2007年12月9日

^{*1}産業技術総合研究所

^{*2}日立建機(株)

^{*1}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2}Hitachi Construction Machinery Co. Ltd.

■ 本論文は有用性で評価されました。

Fig. 1 Photo of "Yamazumi-4"

Fig. 2 Control system of "Yamazumi-4"

と視覚 PC とは LAN で接続されている（参照 Fig. 2）．本論文では，主に PC1 における処理について詳しく述べる．

3. 作業制御

3.1 全体制御

ここで想定している作業は，露天掘り鉱山や碎石場などで行われているホイールローダによる鉱石・碎石のすくい取りと運搬用ダンプトラックへの積み込みである．Fig. 3 に示すように鉱石または碎石の堆積位置と積み込むトラックの間をトラックの荷台が満載になるまで何回もホイールローダは往復しなければならない．すくい取り点と積込点の間をスイッチバックする V 字軌道上を移動する場合がほとんどである．

ホイールローダの制御は，主に車輪と屈曲軸による走行制御系と土砂のすくい取り作業や積込作業などのアーム・バケット制御系とに分かれるが，すくい取りと積み込みにはアーム・バケットと車輪による移動が連動する必要がある．

油圧駆動の建設機械は電動モータと違い，油圧ポンプを駆動するエンジンの回転数が車速や駆動力に大きく影響する．そのため，エンジン回転数から実現できる車速をテーブル化し，エ

Fig. 3 V-shape travelling path of wheel loader

ンジン回転数を能動制御して車速を制御するとともに重作業となるすくい取り・積込作業には最大回転数でエンジンを回す必要がある．

基本的には弁の開閉による油圧制御は流量制御となるので各軸の速度制御に近くなると考えられるが，実際にはシリンダの伸縮を回転に変える機構や油圧ポンプを共有する構造から非線形成分が多く DC モータのような良好な線形性は得られない．速度指令値をフィードフォワード項に持つ位置・速度フィードバック系を PC1 で組んだところで再現性が得られるようになった．

全体システムは，次の部分工程に分けられ，その進行は全体統括する PC2 のプログラムで管理される．

- (1) 初期位置から堆積観測位置までの走行．
- (2) ステレオ視による堆積すくい取り点の決定．
- (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 V 字走行．
- (6) 積み込み．
- (7) すくい取り開始点までの V 字走行．
- (8) トラックの荷台一杯になるまで (4)～(7) を数回繰り返す．
- (9) 最後の積み込み終了後，(7)，(8) を介さず初期位置へ戻る走行．

3.2 擬似クロソイド曲線による経路制御

すくい取り点と積込点の間を往復する V 字軌道は，曲率が曲線経路長に比例するクロソイド曲線を二つつけた対称クロソイド曲線と直線とだけで軌道計画を立てる手法を取る．しかし，Fig. 3 に示されるようにホイールローダは車体を二つに分け，その間の屈曲角で操舵を行う方式をとっている．そこで，曲率とほぼ比例関係にある操舵角が，経路長に比例する擬似クロソイド曲線を用いた対称擬似クロソイド曲線と直線の組み合わせですべての軌道計画を行い，それに沿って経路制御を行う．

初期位置から観測位置までや，観測位置から最初のすくい取り開始点まで，最後の積み込み後から初期位置までのような切り返しを行わない前進のみまたは後退のみの軌道はこの対称擬似クロソイドの組み合わせで作成した．

3.3 ステレオカメラによる土砂位置検出

一般に露天掘り鉱山や碎石場などの作業現場では、すくい取る堆積の位置というのは、精度は保証されないがあらかじめ分かっているものである。ダンプトラックの位置・方向は作業ごとに変わるので、ダンプに搭載した GPS システムと PC から無線 LAN 経由で実時間で取得する。堆積の概略位置とダンプの位置・方向から V 字軌道候補を定める。すくい取り想定点からステレオカメラの撮像域に堆積をとらえられる十分な距離の点を堆積検出点と定め、初期位置から堆積検出点までの軌道を対称擬似クロソイド曲線と直線の連結で生成し移動する。移動後、ステレオカメラで相関法により堆積の三次元立体像を求め、その重心位置に向かう山の裾野の点を実際のすくい取り点として移動する。

3.4 土砂すくい取り作業

すくい取り作業は、油圧ポンプの力を最大限に使うためにエンジン回転数を最大にし、車速も高速にして、バケット先端の底板を水平にして地面にすりながらバケット先端を堆積の下に入れる。その後、バケット掘削反力が閾値を超えたときに車速を緩めてバケットをすくい始める。この掘削反力の閾値の判断は、油圧系で計測される車輪駆動油圧モータの圧力値で行っている。すくい取りではバケットを返す動作とアームを上げる動作を交互に行うことで、堆積を崩しながらすくうことを可能とした。

3.5 ダンプトラックへの土砂積込作業

V 字軌道でダンプトラックに接近後、積込作業ではアームを上げてトラック荷台の上にバケットを運んだ後積載物を投入する。ホイールローダをできるだけダンプに寄せるために、走査型レーザレンジファインダを左右 2 個備え、それぞれの鉛直断面像からダンプ荷台までの距離と高さを計測しながら接近する。同時にバケット先端中央を目標経路に沿わせる操舵制御を行う。

3.6 ブレーキによるインチング制御

ホイールローダは、1 油圧源で駆動されているが、すくい取り作業と積込作業ではアームとバケットに大きな力を必要とするのでエンジン回転数を最大にして駆動する必要がある。しかし、どちらの作業でも車速を低速にして移動し、アームとバケットと車輪移動とが滑らかに協調制御することが求められる。そのため、ブレーキ機構にはインチングと呼ばれる機能が装備されている。インチングとは、止まっては少しずつ進む「インチング移動」のことで、アクセルを全開にして最大エンジン回転数のときでもブレーキペダルを踏むと車輪制動の前に車輪を駆動する油圧モータへの油の流量を下げ、車輪は低速になりかつアームとバケットに油圧の力が効率よく配分される油圧回路で実現される。この機能を有効に使うために、山坩 4 号ではブレーキペダルを踏む電動の直動ロッドを装備し、組込マイコンシステムで制御した。

すくい取り作業では、堆積にバケットを貫入後に、このインチング操作を組み合わせることで、低速制御の性能を向上させ、効率よくバケットに堆積をすくい入れながら前進する動きを実現している。

積込作業では、1 [km/h] 以下の低速で慎重にトラック荷台に横から近づく動作を実現し、堆積を投入する地点で停止させて

いる。

ステレオカメラによる土砂位置検出時にもブレーキを作動させることで、カメラ位置がふらつく外乱が起こることを防いでいる。

また、実験時には安全のために、ブレーキを作動させてからプログラムを終了させている。

4. 軌道追従制御

4.1 仮想車体モデルによる軌道追従制御

軌道追従制御は、車体の代表点を計画軌道に沿わせる制御である。

移動ロボットでよく用いられる左右独立 2 輪機構の場合は、車軸上の左右輪の中点を代表点とすると左右車輪速度の平均が併進速度となり、左右車輪速度差が車体回転角速度となるので、そのモデルに基づくデッドレコニング計算法がよく用いられる。

通常の前輪操舵方式の 4 輪車の場合は車体形状が変更しないので、車体上の任意の点を代表点とすることができるが、曲率中心が絶えず後輪の軸上にあるので、後輪 2 輪の間の中央点を代表点とするモデルで考えることが多い。これにより、4 輪モデルも左右独立 2 輪ロボットと同等に取り扱うことができる。

ホイールローダは、前輪 2 輪を有する前半部と後輪 2 輪を有する後半部に大きく分かれ、その間に鉛直軸まわりに回る車体屈曲型ステアリングを有する構造になっている。したがって、通常の 4 輪自動車と違ってステアリングの屈曲角により車体形状が大きく異なることになる。

筆者らは、屈曲型ステアリングを有するホイールローダでは、前輪と後輪の車軸の延長線の交点が曲率中心となることから、曲率中心を中心とし、前輪車軸上の 2 輪の中点と後輪車軸上の 2 輪の中点を通る円弧と、曲率中心から屈曲軸中心へ向かう半径の交点を仮想車体中心と定義する。これにより、左右独立 2 輪と同等の軌道計画手法を使うことができるとともに、デッドレコニングも左右独立 2 輪と同等の計算方式を使うことができる。左右独立 2 輪モデルでの車体方向を仮想車体方向、車体屈曲軸中心を実車体中心、運転席があり GPS のアンテナが設置されている後部車体の方向を実車体方向と呼ぶことにすると、仮想車体方向は、前輪中央と後輪中央を通る円弧の接線方向となる。Fig. 4 において、

Fig. 4 Virtual body center for dead reckoning and path planning

Fig. 8 Whole experimental result

すくい取り後の積み込みに向かう V 字軌道と積み込み後次のすくい取りに向かう V 字軌道は、直線と対称擬似クロソイド曲線の組み合わせである。直線部および曲線部では、Fig. 6 に示すように、計画軌道上で車輪回転による移動距離に相当する現在位置 Q と GPS 補正デッドレコニングで得られる仮想車体中心 V が求められる。それぞれのサーボサンプル時間 Δt 後の位置を Q' および V' とし、車体方向を x 軸 (図中 x_v 軸) とする車体座標から見た Δt 後の目標位置の y 座標値 (図中 y_v 軸) を横ずれ変位 Δy とし、ステアリング速度へのフィード

バック成分として入力する。

4.4 積み込み時のバケット先端位置制御

トラックへの積込作業時には、バケットを上を持ち上げた状態では、横方向の急ステアリングをきることは転倒の原因となりえるので、軌道追従制御を行わず、車体安定のためにステアリング角を 0 にするフィードバックを行う。しかし、V 字軌道走行終了時に軌道から横ずれと車体方向の誤差が残ってしまった場合には、堆積の最終投入位置が大きくずれることになる。そこで、積込作業の最初のアームを上げながらかつ減速しながら

近づく2[m]の区間で、軌道制御を行い修正を行うことにした。

積込作業時に走行時と同じ仮想車体中心を目標軌道に近づける制御を行うと、ステアリングを駆動した結果バケットは目標位置から却って遠ざかる動きをすることもある。積み込み時に必要な精度は、トラック荷台に対するバケットの位置であるので、バケット先端中央位置を計画軌道に近づける制御を軌道追従フィードバック制御に組み込んだ。

Fig. 7に位置関係の例を示す。トラックの荷台での積込点すなわち堆積をバケットから投入する位置 D (bucket dumping point) は、軌道計画時にトラック荷台端からの距離 d で指定される。V字軌道計画の終了点 S から、トラック荷台に垂直に近づく直線 SD がトラックへの接近時の積込計画経路 (loading approach line) である。Fig. 7のような場合には、前節で述べたV字軌道上での軌道追従制御ならば仮想車体中心 V に対して計画軌道線は進行方向右側にあるので、フィードバック項としては負の値 Δy が使用され結果として右方向へのステアリング旋回指令が出されることになる。しかし積み込み時は、バケット先端位置 B を計画された投入位置 D に持ってくるのが重要なので、 B から見た計画経路直線の横ずれ Δy_{ld} を Fig. 5のフィードバック項 Δy に代わって代入することでバケット先端を計画軌道に近づける制御を行う。Fig. 7の場合には、 Δy_{ld} は正の値をとり、結果的に左旋回のステアリング指令が出されることになる。

5. 実 験

5.1 全体作業制御結果

前章までに述べた作業制御に従った実験結果を Fig. 8に示す。

実験用の堆積は砂利 (粒度: 5~20 [mm]) であり、体積は約100 [m³] である。ダンプトラックは通常の10 [t] ダンプであり、GPS センサと PC と無線 LAN を搭載したほかは特に改造はしていない。

ダンプ荷台に均等に積むために、前後左右の4箇所を荷降ろし点として設定し、設定位置に4回の積み込みを完了した。

5.2 軌道追従制御結果

計画走行経路に対する追従制御結果を Fig. 9に示す。座標値は、GPS で計測された緯度・経度情報を実験場に設定された座標に変換した結果である。

Fig. 9中で、“planned” がすくい取り終了時と積込終了時に PC2 において計画されたV字軌道を表し、“actual” が GPS 参照デッドレコニングから算出された仮想車体中心の走行軌跡を表す。

“truck” は、トラックに搭載された GPS で計測されたトラックの位置と車体方向に合わせて組み込んだ車体外形である。“pile” は、ステレオカメラによって検出された堆積の位置・方向に合わせて描いた模式図である。

曲線経路に沿って後退したときに経路追従誤差が大きくなる傾向があることが見て取れるが、前進で走行するすくい取り接近線と積込接近線は重なっており、追従制御がよく作用していると考えられる。

Fig. 10 (a)~(d) に Fig. 9 で示す実験における積込作業時のバケット先端中央の軌道制御の結果を示す。Fig. 10 で “truck”

Fig. 9 Trajectory of the virtual body center in experiment

で表示されているものがトラックの外形および荷台前方のプロテクタ板、前輪2輪と後輪4輪のタイヤ位置を線画で表したものである。“planned” で示されている破線がバケット先端中央の計画軌道でV字軌道終了点から放土点までトラック荷台横に垂直に接近するように設定されている。“actual” で示された実線が実験時のバケット先端中央点の軌跡である。“bucket” で示された点線の長方形は、放土点でのバケットの開口部の輪郭を表す。

Fig. 10 (a)~(d) のキャプションに示されているように、4回の積込点の設定はトラック荷台上の前後左右の4点である。前後の違いはすくい取り点から土砂を運ぶV字軌道の終了点をトラックの進行方向に平行にずらすことで設定した。また、トラック荷台上の左右の違いはホイールローダがバケットをトラック荷台の上に持ち上げた状態で接近し停止する位置の違いで設定した。ただし、実際の積込作業の制御ではGPSで計測される位置情報で停止するのではなく、左右の鉛直面走査型レーザレンジファインダでトラック荷台までの距離を実時間で計測し、そこからトラック荷台の上に侵入したバケット先端の水平方向の深さを算出して車輪停止を行っている。即ちトラック荷台の左右の違いはホイールローダのバケット先端が侵入する荷台端からの距離で設定した。

Fig. 10 (a)~(d) では計画軌道よりもバケット先端中央がいずれも進行方向に向かって右側にずれていたものが最初の2[m]の区間のバケット先端位置制御により計画軌道寄りに修正されている。修正後のバケットを持ち上げた状態では安全のためにステアリングをロックしているので計画軌道を横切る場合もあるが大きなずれにはなっていない。

6. お わ り に

本論文では、自律型ホイールローダによる堆積のすくい取りおよびダンプへの積込作業の制御に関して、GPS 測位を用いた作業制御と軌道追従制御について述べ、実験により実際の碎石作業現場や鉱石探掘現場に必要な作業を実機を用いて無人で完

Fig. 10 Trajectory of bucket front center in loading

遂できることを確認した。

今後、走行速度や作業速度を速め、トラックの位置をより堆積に近づけ、より経路長を短くして作業時間を短縮し、より実用に近い作業の制御手法の開発を行う予定である。

本論文で用いたシステムは舗装路上に碎石を設置して実験を行ったが、用いた実験機は商用に販売されている実機を改造したものであり、追加した角度センサ、GPS、レーザレンジファインダ、制御用 PC、組込マイクロコンピュータなどはすべて市販されているものまたは既に実機使用されているものばかりであるので、実用化段階と非常に近い構成であるといえる。また、大規模な露天掘り碎石場では高価なタイヤのパンクを防ぎ作業効率を上げるために夜間にホイールローダやダンプの走行面を手間をかけて平坦な状態に保守をしていることが現場でのインタビューなどから明らかになっており、本実験環境と条件がそれほど変わらないと考えられる。

鉱山現場や土木現場では雨天などの悪天候でも屋外作業を行うので、実験と実用化場面とでは環境条件の違いが大きいのではないかと指摘されることがある。しかし、本システムで用い

たホイールローダ本体、GPS、レーザレンジファインダは鉱山現場などで使用されている屋外用のもので実用化段階と比べて環境条件の違いの影響は従来ほど大きくないと考えている。事実、大雨の中でもデモンストレーション実験を行ったことがあり、問題なく一連の作業に成功した実績を持つ。

また、一部の鉱石採掘現場ではすでにダンプの無人化と自動運転が実用化されており [7] [8]、本システムとの連動で完全無人自律採掘作業が可能になると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 皿田, 坪内, 大隈, 栗栖, 安達: “ホイールローダによる土砂搬送作業の自律化の試み—「山祇プロジェクト」について—”, 第 10 回建設ロボットシンポジウム, pp.173-178, 2004.
- [2] S. Sarata, H. Osumi, Y. Kawai and F. Tomita: “Trajectory Arrangement based on Resistance Force and Shape of Pile at Scooping Motion,” ICAR 04, pp.3488-3493, 2004.
- [3] S. Sarata, Y. Weeramhaeng and T. Tsubouchi: “Approach Path Generation to Scooping Position for Wheel Loader,” IEEE ICRA, pp.1821-1826, 2005.
- [4] 小谷内, 皿田, 菅原: “自律ホイールローダ「山祇 4 号」の基礎制御”,

- 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1G33, 2006.
- [5] S. Sarata, N. Koyachi, T. Tsubouchi, H. Osumi, M. Kurisu and K. Sugawara: "Development of Autonomous System for Loading Operation by Wheel Loader," IS-ARC 2006, pp.466-471, 2006.
- [6] Trimble 社:MS Series Operation Manual version 1.5, Part Number 40868-03-ENG, Revision A, March 2003.
- [7] A. Hori, S. Nakanura, T. Okuda and S. Hirose: "Off-highway truck unmanned navigating systems," Proceedings of the second international symposium on mine mechanization and automation, pp.425-434, 1993.
- [8] 宮下, 川地, 石井: "無人ダンプトラック走行システムの開発・運用", 第 67 回石灰石鉱業大会予稿集, pp.1-14, 2008.

小谷内範穂 (Noriho Koyachi)

1979 年京都大学工学部機械工学科卒業。現在独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門 3 次元視覚システム研究グループ主任研究員。1988～1989 年米国オハイオ州立大学客員研究員。博士 (工学)。レーザー応用複合生産システム, 作業用三次元車椅子, 極限作業ロボット, リム・メカニズム, 人間共存・協調ロボットシステム, 建設作業自動化, フレキシブル・パーソナル・ロボット等の研究に従事。IEEE, JARA, システム制御情報学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

皿田 滋 (Shigeru Sarata)

1974 年北海道大学工学部資源開発工学科卒業。1974 年住友石炭鉱業入社。1978 年通商産業省工業技術院公害資源研究所入所。現在独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門フィールドシステム研究グループ主任研究員。工学博士。鉱山作業の自律化特にホイールローダと油圧ブレイカーの自律システムの研究に従事。資源・素材学会会員。(日本ロボット学会正会員)

菅原一宏 (Kazuhiro Sugawara)

1987 山形大学工学部電気工学科卒業。1987 日立建機入社。現在, 建設機械の自動化・無人化技術の開発に従事。