ダンプトラック無人走行システムの
開発について* 堀 井 善 司¹

Development of Offroad Unmanned Dump Truck Navigation System

by Zenji HORII¹

1. Former Senior Managing Director, Nittetsu Mining Co., Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo 100

This is to describe a Large Offroad Dump Truck Unmanned Navigation System used in Torigatayama Limestone Quarry.

The system has been developed with cooperation of Nittetsu Mining Co., Ltd. and Shin Caterpillar Mitsubishi Ltd. and equipped on CAT 777B (85 tons payload). The system has been in production use.

The Unmanned Truck enables high speed travelling under severe climatic conditions.

The Unmanned Dump Truck Navigation System has following features.

- 1) The system is an Autonomous Guidance System and does not need large ground facilities such as guiding lines.
- 2) The system is of all weather type and can be used day and night under severe climatic conditions in quarries.
- 3) The system is composed of multiple fail-safe constructions.
- 4) The system is fleet system that controls a set of trucks as a fleet.
- 5) The system has a learning function of a loading position.
- 6) The system has maximum ground speed of 30 km/hr in forward and 10 km/hr in reverse, which enables high speed travelling.

KEY WORDS: Unmanned Navigation, Autonomous Guidance, Fleet System

1. は じ め に

オフロード大型ダンプトラックの無人走行システムを開発し、日鉄鉱業(株)の鳥形山鉱業所でCAT 777Bダンプトラック(85t積み)に搭載し実用稼働を行っている(図1)。本無人走行システムは誘導線などの誘導設備が不要な自律走行型であり、かつ厳しい自然条件の中でも安定した生産性を維持できる全天候性能をそなえたもので、露天掘鉱山の頻繁に変化する走路に対して柔軟に対応できるシステムである。

2. 開 発 の 経 緯

1981年(昭和56年)濃霧・吹雪・暴風雨という厳しい気象条件の下で安全かつ効率の良い生産を行うために、採掘機械の運転を無人化するというアイデアが出され、具体的な検討が行われた。当時の技術水準と鳥形山の採掘条件を考慮し、無人化の対象としては、ダンプトラックの無人化が最も現実的であり生産の合理化に効果があるとの結論を得た。しかし、ダンプトラックによる鉱石運搬作業を無人化するにはダンプトラック自体の詳細な情報が不可欠であることから、1983年(昭和58年)日鉄鉱業(株)と建設

機械メーカーであるキャタピラー三菱(株)(現、新キャタピラー三菱(株))の間で共同開発のプロジェクトを発足させた。その後の開発経緯は下記の通りである。

1986年(昭和61年)9月

1号機を鳥形山に搬入し無人システムの試験を開始

1989年(平成元年)7月

2号機を鳥形山に搬入しフリート制御システムの試運転開始

1990年(平成2年)10月 本格稼働開始

図1 無人走行システムを搭載したCAT 777Bダンプトラック

* 平成4年(1992年)3月27日、本会総会にて第66回渡辺賞受賞

1. 正会員 日鉄鉱業(株) 元専務取締役

キーワード: 無人走行, 自律誘導, フリートシステム

3. 無人走行システム開発の目的

(1) 鉱石運搬作業の合理化

運搬作業の合理化に関しては、人員の削減を図ると同時に全天候型のシステムを完成させることにより天候やオペレータの熟練度に左右されない安定した生産性を確保しようというものである。

(2) 作業環境の改善

悪天候下に切羽内の決まった走行路をダンプトラックに乗って長時間走行するのは負荷の掛かった単純繰り返し作業であるといえる。今後、若年労働者の確保が難しい傾向はますます顕著になることが予想され、無人化はこれに対する抜本的な対策である。

(3) 技術力の向上と蓄積

日鉄鉱業(株)にとってはメカトロは未経験の分野であった。しかし、採掘機械においてもマイコン内蔵型が増えつつある状況から、ユーザーの立場としてもメカトロに関する技術力が不可欠であるとの認識からこのプロジェクトを通じて技術者の養成を図ることとした。

4. 無人システムの概要

(1) システムの機能

本システムは次の3つの方法でダンプトラックを走行させることができる。

① **マニュアル操縦モード** 通常のダンプトラックと同じく人が運転するモード。切羽間の移動など長距離の移動に使用する。

② **無線操縦モード** ダンプトラックの外部から無線操縦機によって運転するモード。無人運転中の積込場所の移動など短距離の移動に使用する(図2参照)。

③ **無人制御モード** コンピュータ制御により自動運転するモード。このモードにはあらかじめ入力した固定コースを走行する第1モードと無線操縦により移動した位置を学習し、それによってコンピュータが走行コースを計算して自動走行する第2モードがある(図3参照)。

第1モードと第2モードを合わせて無人制御モードと呼んでおり、プログラムに従い自動走行するモードである。

図2 積込機に搭載した無線操縦装置

第1モードは、あらかじめ入力されている固定した走行コースを走行するが、第2モードは無線操縦により移動した位置を学習しそれによってコースを作成して自動走行することができるものである。この機能により積込み機の運転手は積込み位置を自由に変更し、なおかつダンプトラックは次のサイクルからは前回移動させられた位置に自動位置付けをすることが可能である。

(2) システムの構成(図4参照)

① **現在位置計算** 本システムで採用したダンプトラックの誘導方法は、あらかじめ入力されている走行コースとダンプトラックの現在位置を逐次比較して、コースからのズレを修正するように制御を加え、あらかじめ入力されている走行コースに沿って走行する方法であり、一般に慣性誘導航法と呼ばれているものに近い誘導航法である。

この航法では移動するダンプトラックの現在位置の座標を常に計算しておく必要がある。本システムでは車載ジャイロコンパスから得られる車両の進行方位と、車輪の回転より得られる移動距離を計算して、車両の現在位置を求めている。この算出された現在位置座標にはジャイロコンパス指示の誤差や、タイヤのスリップによる誤差が含まれているので、そのまま放置していれば誤差が累積し、あらかじめ入力されている走行コースから大きなズレ

図3 走行コース説明図

図4 無人走行システム構成図

を生じる。このため、コースの特定の場所で車両の位置座標と進行方位を自動的に測量し、累積誤差を補正するシステムを搭載している。

② **ステアリング制御** 現在位置の計算結果より所定のコースとのズレを小さくする方向にステアリング制御を行う。

③ **車速制御** 本システムで採用した速度制御は一般的なオートクルーズ制御に発進・徐行・停止制御を追加し、安全走行のために走路制限を付けた制御方法である。制御パターンには次のような6種類がある。

- イ) 加速制御・・・停止した車両をあらかじめ入力された目標の速度まで定められた加速度で加速する。
- ロ) 定速制御・・・目標の速度を維持しながら走行させる。
- ハ) 減速制御・・・あらかじめ入力された減速度で目標の速度まで減速する。
- ニ) 徐行制御・・・即時停止ができる速度を維持しながら走行する。
- ホ) 停止制御・・・車両を停止させ、停止したまま待機する。
- ヘ) 非常停止制御・・・コンピュータによる非常停止命令で車両を停止させる。

これらのパターンのうち定速制御、減速制御にはそれぞれ制御リミットが付加されており、走路の条件が極端に変化した場合は異常と判断し車両を停止するようになっている。

④ **車体機器制御** 方向指示器・クラクション・荷台を適切に作動させる。

5. システムの安全対策

安全性についての検討は最も重要であり、本システムの開発に当たって最優先の課題として取り組んだ。原則的にはシステムが故障した場合等により、あらかじめ設定した条件から外れた場合は、車両は自動的に停止するフェイル・セーフ構造とした。

(1) ハードウェアの安全対策

① **ブレーキ** ベースマシンであるCAT777Bにはサービスブレーキ、駐車ブレーキ、非常ブレーキの3系統のブレーキが装備されている。この内、非常ブレーキは駆動空気圧が減少したときまたはエンジンが停止したときにスプリングの力で自動的に作動する構造となっている。システムに異常が発生したときは、エンジン停止回路を作動させ車両を停止させる。

② **車両異常検出** この車両には車両の主要部分の異常を検出するモニター装置が装備されている。この出力を監視し、また車両の主要部分に異常が発生した場合には、車両を停止させる。モニターされる項目は以下の通りである。

- ・エンジン冷却水温異常
- ・冷却水量異常
- ・トルコン・ブレーキ冷却油温異常
- ・エンジン油圧異常
- ・発電機発電不良
- ・ブレーキ作動空気圧低下
- ・トランスミッション潤滑油フィルタ目詰り
- ・燃料フィルタ目詰り

③ **無人走行装置のサーボ系** 無人走行装置の電気駆動式アクチュエータは電源がOFFになるとすべてマニュアル状態になる。マニュアル状態になれば車両には駐車ブレーキが自動的に作動し、トランスミッションは中立になって車両は停止する。

④ **コンピュータ基板** コンピュータ電源や基板はノイズによる誤動作を防止するために各種のノイズフィルタおよびノイズに強い素子を装着している。また、搭載されている7枚の基板は直接車両を非常停止させる回路を装着しており、いずれかのコンピュータが異常を検出すれば車両は自動的に停止する。

⑤ **無線装置** 本システムで採用している車両間無線装置では、電波が正常に受信されている場合に限り無人走行および無線操縦が可能であり、電波が途絶えたり正常なデータが受信できない場合には車両は停止する。

(2) ソフトウェアでの安全対策

本システムを動かしているプログラムには以下のような、多くのエラー検出機能が組み込まれている。

① **データ通信に関するエラーチェック** 7台のコンピュータが通信回線を通じて制御データを交換しながらシステムが動いているので、流れているデータに誤りがあると正常な制御ができなくなる。このためにデータのチェックを6重に行い異常を認めた場合はそのデータを無効とする。これが連続して発生する場合はシステムを非常停止させる。

② **センサの作動異常チェック** その出力が正常の範囲内かどうかチェックする。異常と判断されればシステムを非常停止する。

③ **入力データのチェック** その値が正常の範囲内かどうかチェックする。異常なデータは受け付けない。

④ **アクチュエータの異常チェック** ステアリング、ブレーキ、エンジンの各制御装置の異常に対しては、それらを制御するコンピュータで直接作動異常をチェックすると同時に、その機器を直接作動させていない別のコンピュータでもチェックを行う。異常と判断されればシステムを非常停止する。

⑤ **記憶素子の異常チェック** 制御用コンピュータの記憶素子に異常が発生していないかを確認できるようにしている。電源投入時にこれをチェックし、異常があれば無人運転に切り替わらない。

⑥ 無人ダンプトラック同志の衝突防止

(イ) 車両間通信でお互いの位置を常に確認し、車両距離が35m以下になれば後続車が自動停止する。

(ロ) 積込みエリアおよびダンプエリアの中に他のダンプトラックがいれば後続車はそのエリアには入れない。

⑦ **立坑投入位置チェック** 立坑部に立坑位置を示すポールを設置し、このポールを検知することにより立坑へのアプローチコースの誤差を検出し、誤差が大きい場合には非常停止する。

(3) 運用に関するもの

表1 無人ダンプトラックの稼働実績 (1990. 10～1991. 11)

	16号ダンプトラック			18号ダンプトラック			合 計		
	稼働時間 (hr)	運搬量 (t)	能率 (t/hr)	稼働時間 (hr)	運搬量 (t)	能率 (t/hr)	稼働時間 (hr)	運搬量 (t)	能率 (t/hr)
1990年10月	214	77,435	362	215	78,455	365	429	155,890	363
11月	227	80,580	355	233	81,345	349	460	161,925	352
12月	211	90,355	428	192	78,650	410	403	169,005	419
1991年1月	219	101,320	463	201	79,645	396	420	180,965	431
2月	192	67,150	350	216	84,405	391	408	151,555	371
3月	204	79,645	390	227	86,700	382	431	166,345	386
4月	230	95,200	414	210	87,125	415	440	182,325	414
5月	229	88,910	388	267	109,225	409	496	198,135	399
6月	152	45,305	298	174	67,915	390	326	113,220	347
7月	195	83,130	426	144	60,775	422	339	143,905	424
8月	112	38,165	341	122	42,585	349	234	80,750	345
9月	184	72,165	392	171	66,555	389	355	138,720	391
10月	183	74,120	405	210	86,360	411	393	160,480	408
11月	130	54,910	422	216	106,505	493	346	161,415	467
合 計	2,682	1,048,390	391	2,798	1,116,245	399	5,480	2,164,635	395

① 専用切羽を設ける 無人ダンプトラックが走行する区域は出入り口一個所を除き全周を土盛りで囲み、他の車両や人が誤って入り込むことを防止する。出入り口には無人ダンプトラック専用切羽の標示と立入り禁止の標示を行う。なお、仕切りの土盛りの上には赤いスコッチコーンを並べ、他の土盛りと区別している。

車両の点検や給油でダンプトラックに接近する場合は、積込機の運転手に無線で連絡し、ダンプトラックのエンジンが停止したことを確認してから接近する。積込機の運転手は入って来た人から、専用切羽内から退出した旨を無線で連絡を受けてから、無人運転の再開を行う (図3参照)。

② 無人ダンプトラックの判別 ダンプトラックが無人走行中はダンプトラックに搭載したスピーカーより音楽を放送する。これにより近くにいる作業員の注意を喚起する。

③ 始業点検・試験走行 無人ダンプトラックの運転を開始する前には、通常のダンプトラック始業点検と同じ点検をし、更にシステムを立ち上げた後にシステムの点検のために担当者がダンプトラックに乗車して試験走行を行い、システムの状態を確認する。

④ 制御データの入力・変更 制御データの入力・変更については十分な教育を受けた作業員のみが行う。

6. 無人ダンプトラックの運用

現在、鳥形山では無人ダンプトラック (CAT777B) 2台と無線操縦装置を搭載した積込み機 (CAT992C) 1台で運用している。以下にシステムの起動と運用および終了手順の概略を示す。

(1) システムの起動手順

- ① 2台のダンプトラック本体および無人走行システムの始業点検を行う。
- ② 起動員が運転席で運転して1台目のダンプトラックを出発地点 (図3の地点A) にセットする。
- ③ コースおよびパラメータの確認を行う。
- ④ 無人制御モードを起動する。
- ⑤ 無人走行で立坑に行き積み荷を空けた後、待機ポイントまで走行し、待機する。
- ⑥ 無人走行に異常がなければ起動員は下車し2台目のダンプトラックに乗車し、②～⑤の作業を行う。

(2) 積込み・運搬サイクル

積込み機側の操作としては、自動的に積込み位置に入ってくるダンプトラックに積込みを行い、積込みが終了したら積込機運転席に装着した無線操縦装置の再起動ボタンを押しスタートさせる。ただし、積込み位置を変更する場合は、待機ポイントから発進したダンプトラックを一時停止ボタンにより停車させ、ジョイスティックにより任意の位置に無線操縦で誘導する。次のダンプトラックからは新しい積込み位置に自動的にセットされる。

(3) システムの終了手順

作業終了時は無線操縦装置のコース選択スイッチを駐車場に帰着するコースに合わせれば、ダンプトラックは自動的に駐車場所に格納される。その後、担当者がダンプトラックのシステムの電源を切って作業を終了する。

7. 無人ダンプトラックの生産性

平均片道運搬距離345mのとき、無人運転の平均サイクルタイムが9分26秒という実績が出ている。この場合、運搬能率は541t/時/台である。

一方、85t有人ダンプトラックの場合、平均片道運搬距離478mのとき、サイクルタイムは9分55秒で514t/時/台の能率であった (両者とも使用積込機はCAT992C)。

1990年10月より1991年11月までの2台の無人ダンプトラックの累積稼働時間は5,480時間で累積運搬量は2,164,635tとなっている (表1参照)。

全く同一条件での有人・無人の能率比較はまだ行っていないが無人ダンプトラックの生産性は、一応有人並のレベルに達したと言える。

8. おわりに

1983年に開発に着手して以来8年が経過し、一応実用に供することができているが、未解決の課題も幾つか残されている。

残された課題としては坂道での走行速度制御、走路上人頭大程度の落石を検出できる障害物センサの開発がある。また、無人ダンプトラックを使用する側として、無人ダンプトラックの性能をフルに引き出せるような運用をすることが重要である。これらの課題が解決できれば無人ダンプトラックの応用範囲が大きく拡大するものと確信する。