

簡易的な機器改造による六輪ダンプトラックの自動走行に関する研究開発

Autonomous driving of six-wheel dump truck with minimal remodeling

○学 今野陽太 (東北大) 小松智広 (コーワテック (株))
正 永谷圭司 (東北大)

Yota KONNO, Tohoku University, konno@frl.mech.tohoku.ac.jp
Tomohiro KOMATSU, Kowatech, komatsu@kowatech.co.jp
Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@ieee.org

In recent years, Japanese general contractors have two problems: poor working environments and reduction of laborer due to a declining birthrate and an aging population. Particularly, this problem becomes serious in local small and medium-sized enterprises(SME). Therefore, our research group has been conducting research aiming at realization of autonomous driving for six-wheel dump trucks that SME can introduce. In this research, firstly, we examined functions required for autonomous driving. Then, we implemented necessary equipment on a six-wheel dump truck with minimal remodeling. Finally, we carried out an autonomous driving test with an actual six-wheel dump truck, and verify the proposed method with minimal remodeling of the dump truck.

Key Words: Construction machine, Robot, automatic running, six-wheel dump truck

1 緒言

近年、日本では少子高齢化問題が表面化し、その影響は多岐にわたる。総合建設業では、平成 27 年度時点で、就業者のうち約 3 割が 55 歳以上かつ約 1 割が 29 歳以下である [1]。そのため、今後の労働力不足が懸念されており、特に地方の土木建設工事においては、既にこの問題が深刻化している。一方で、建設業は、平成 27 年度の業種別死者数において、約 4 割であり、全産業の中で最も高い値となっている [2]。このことから、施工現場の作業員が、事故が多発する危険な環境下での作業を行っていることがわかる。

これらの問題を解消するため、大手建機メーカーは、建設機械の自動化に取り組んでいる [3]。しかし、このような建設機械の導入には、膨大な費用がかかることや、施工現場ごとに走行路面や土砂の荷下ろし場所が変化することなどの問題があることから、導入は、現状、大手総合建設会社の特定の現場に限られている。よって、建設業界に多く存在する地方の中小建設会社への導入には至らず、上述の問題は解消されていない。

また、安全面の観点から、無人化施工技術の開発が盛んに行われている [4]。無人化施工技術は、人の立ち入りが危険だと考えられる災害現場に適用され、建設機械を遠隔操縦で動作させることで、人の安全を担保している。しかし、無人化施工技術に関しても、費用や作業効率の問題から、地方の中小建設会社への導入に至らないのが一般的である。

そこで、筆者らの研究グループでは、地方の中小建設会社が導入可能な六輪ダンプトラックの自動走行の実現を目指し、研究開発を行ってきた [5]。本研究では、地方の中小建設会社が容易に自動化技術を導入することを目的とし、簡易的な機器改造による六輪ダンプトラックの自動走行の実現を行う。そのため、簡易的な機器改造による自動走行に要求される機能の検討と実装を行う。また、簡易な機器改造を行った六輪ダンプトラックで自動走行実験を行い、目標経路への追従性を検証する。

2 自動走行に要求される機能の検討

ダンプトラックの自動走行を実現するために要求される機能は、大きく以下の三つに分類される。

1. 車両のハンドル・アクセル・ブレーキなどの操作を行う車両操作機能

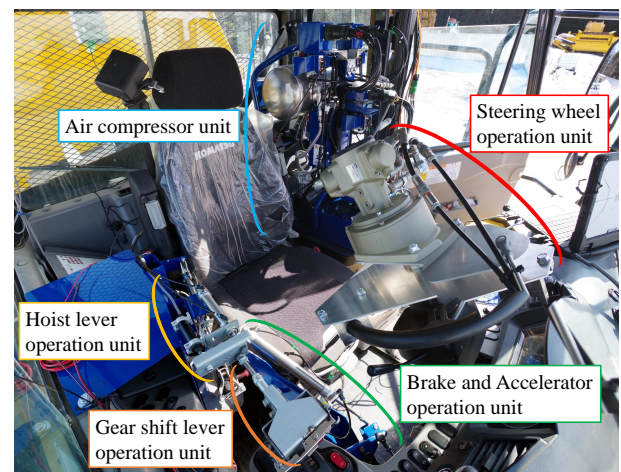


Fig.1 Active robot SAM for vehicles

2. 速度・位置などの車両制御の際に必要な情報を取得する車両情報取得機能
3. 障害物や走行路面など周辺の環境を認識するための環境情報取得機能

1 は車両の前進や旋回動作を実現するために必要である。また、本研究では、車両の後進動作や土砂の積み下ろし動作の実現も 1 の機能として必要であると考えている。2 は車両を制御の際に、取得した情報を使用するために必要である。3 は実際の工事現場を走行する際に、走行路面の変動や、作業中の車両や作業員を検知し、事故の発生を防ぐために必要である。

本研究では、これまでに、環境が既知のテストフィールドで実験を行っているため、3 に示す機能の実現を今後に持ち越し、1、2 の機能を簡易な機器改造によって実現することとした。

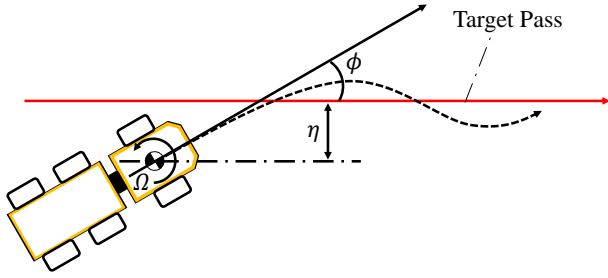


Fig.2 Linear path following method

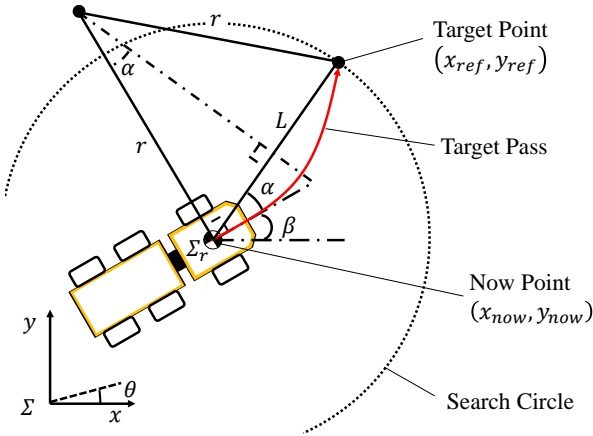


Fig.3 Pure pursuit method

3 機器改造による機能の実装

2章で要求された機能を実現し、既存のダンプトラックでの自動走行を行うため、簡易な機器改造による機能の実装を行った。

3.1 車両操作機能

車両操作機能を実現するため、コーワテック社製油圧ショベル遠隔操作装置であるアクティブ・ロボSAM[6]を車両用に改造した。改造したSAMを図1に示す。改造したSAMにて可能な操作を、以下に挙げる。

- ステアリングハンドル操作
- ブレーキ・アクセルペダル操作
- ホイストレバー操作
- ギアシフトレバー操作

上述の全操作には、空圧サーボアクチュエータが使用されている。空圧サーボアクチュエータは、低負荷であれば応答性が早く、振動、衝撃などの外乱に対しても有効である。

ステアリングハンドル操作部は、エアモータを使用するため、車両の旋回動作が可能となる。ブレーキ・アクセルペダル操作部は、空気圧シリンダと角度センサを使用して駆動し、車両の加減速が可能となる。また、アクセルペダルとブレーキペダルの操作は一体となって行う。ホイストレバー操作部とギアシフトレバー操作部は、どちらも空気圧シリンダとリニアポテンシオメータを使用して駆動する。また、ホイストレバー操作部によって、車両後部の荷台の操作を行い、土砂の積み下ろしが可能となる。さらに、ギアシフトレバー操作部によって、ギアチェンジを行うため、車両の前進、後進が可能となる。

以上の操作部は、座席に取り付けられたエアコンプレッサから供給される空気によって駆動する。

3.2 車両情報取得機能

車両情報取得機能を実現するため、位置情報・方位が取得可能である Hemisphere 社製 ssV-102、GPS コンパスを用いた。また、この GPS コンパスを利用して位置情報の差分を計算し、車両速度を求めることとした。

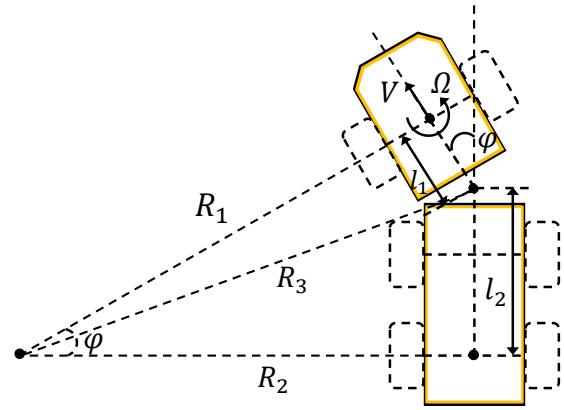


Fig.4 Kinematics of articulated dump truck

さらに、車両前部と後部の連結角度を取得することができれば、4.2節で述べる運動学を用いて、車両の旋回速度が導出可能である。そこで、本研究では、車両両端に設置した MUTOH 社製ワイヤ式リニアエンコーダによって、車両前部と後部の両端の距離をそれぞれ取得した。車両前部と後部の両端の距離と車両前部と後部の連結角度には線形性があるため、車両前部と後部の連結角度を求めることが可能となる。

4 目標経路を追従する制御手法の検討

自動走行を行うため、目標経路を追従する制御手法を検討する必要がある。本研究では、二種類の代表的な経路追従手法での実験を行うこととした。また、走行の制御の際に必要な、車両の旋回速度を導出するため、アーティキュレート型車両の運動学の構築を行った。

4.1 目標経路を追従する手法

自動走行を行うためには、目標となる経路を追従する手法として、一般に移動ロボットに適用されている直線経路追従法 [7] と、自動運転を行う一般車両に適用されている Pure Pursuit 法 [8] の二種類を用いた。

4.1.1 直線経路追従法

直線経路追従法を概念図を図2に示す。目標直線と現在位置との距離を η 、目標直線と現在の方角がなす角を ϕ 、現在の車両の旋回速度を Ω 、それぞれの制御ゲインを k_η 、 k_ϕ 、 k_Ω とすると、一般に式 (1) を満たすように車両本体の目標旋回速度を決定すればよいことが知られている [9]。

$$\left(\frac{d\Omega}{dt}\right)^{ref} = -k_\eta\eta - k_\phi\phi - k_\Omega\Omega \quad (1)$$

また、旋回速度を決定するために、式 (2) を用いる。

$$(\Omega(t + \Delta t))^{ref} = \Omega(t) - (k_\eta\eta(t) + k_\phi\phi(t) + k_\Omega\Omega(t))\Delta t \quad (2)$$

以上の式を使用して車両旋回速度を決定する。なお、本実験では、目標経路が円弧になっている箇所において、直線追従の点をおよそ 1[m] の間隔で設定し、円弧を作成している。

4.1.2 Pure Pursuit 法

Pure Pursuit 法の概念図を図3に示す。Pure Pursuit 法では任意のパラメータ d と現在の車両速度 V から、目標点を決定する。現在位置から目標点を探索する円の半径を L とすると、式 (3) のように表される。

$$L = Vd \quad (3)$$

図3にて、目標点 (x_{ref}, y_{ref}) と現在位置 (x_{now}, y_{now}) を通る直線の角度と現在の車両の方角 β の差 α は、式 (4) のように表される。

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ref} - y_{now}}{x_{ref} - x_{now}}\right) - \beta \quad (4)$$



Fig.5 Experiment environment



Fig.6 Articulated dump truck

また、目標点と現在位置の二点を通り、現在の方が接線となる円弧を目標経路として生成する。このとき、円弧の半径 r は、

$$r = \frac{L}{2 \sin \alpha} \quad (5)$$

と導出できる。

以上の式より、車両旋回速度は式 (6) によって決定される。

$$\Omega = \frac{V}{r} = \frac{2V \sin \alpha}{L} \quad (6)$$

4.2 アーティキュレート型車両の運動学

4.1 節で導出した式により、ダンプトラックの車両旋回速度が決定されるが、車両操作機器にて操作可能なステアリングハンドルは、車両前部と後部の連結角度を操作するものである。よって、車両旋回速度の指令値を実現するため、アーティキュレート型車両と呼ばれる、車両の前部と後部の間の関節を屈曲させることで操舵する車両の運動学の構築を行った。図 4 にアーティキュレート型車両の運動学を示す。車両旋回速度を Ω 、車両走行速度を V 、車両連結角度を φ 、前方車軸長さを l_1 、後方車軸長さを l_2 、角節点旋回半径を R_1 、 R_2 、 R_3 とすると、図 4 より、

$$R_1^2 + l_1^2 = R_2^2 + l_2^2 = R_3^2 \quad (7)$$

$$R_2 = R_1 \cos \varphi + l_1 \sin \varphi \quad (8)$$

が得られる。次に、式 (7) に式 (8) を代入し、 R_1 について解くと、

$$R_1 = \frac{l_1 \cos \varphi + l_2}{\sin \varphi} \quad (9)$$

が得られる。事前に計測した値より、対象とするダンプトラックは、 $l_1=1.20[\text{m}]$ 、 $l_2=4.61[\text{m}]$ である。また、車両旋回速度は

$$\Omega = \frac{V}{R_1} \quad (10)$$

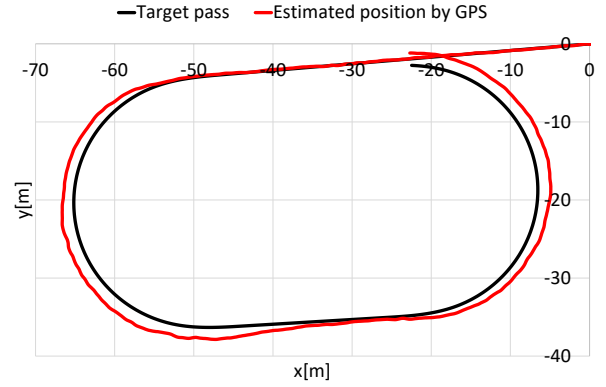


Fig.7 Experiment results of linear path following method

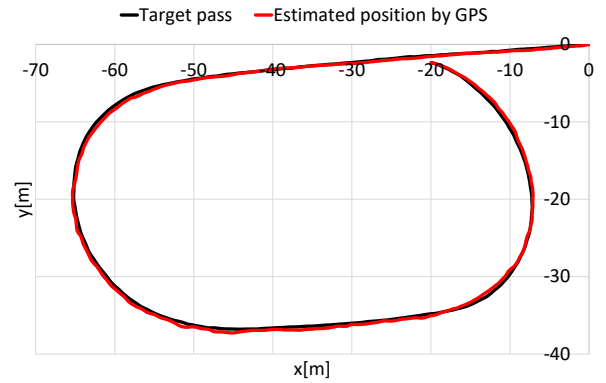


Fig.8 Experiment results of pure pursuit method

より求められる。以上より、車両連結角度と車両走行速度から、車両旋回速度が決定されるため、車両旋回速度の指令値が実現可能となる。

5 自動走行実験

5.1 実験条件, 目的

簡易な機器改造を行った六輪ダンプトラックで、目標経路への追従性を検証するため、自動走行実験を行った。走行手法は 4.1 節で説明した二通りの経路追従手法を使用し、比較することとした。実験は、指令並進速度を $6[\text{km/h}]$ として走行を行い、目標経路と GPS から得られた走行経路の誤差を比較した。また、走行は複数回行うこととした。

5.2 実験環境

実験は、傾斜がほぼない平坦な土地で行った。実験環境を図 5 に示す。実験に使用したアーティキュレート型六輪ダンプトラックである、コマツ社製 HM300-5 を図 6 に示す。

5.3 実験結果

図 7 に直線経路追従法での走行実験結果を、図 8 に Pure pursuit 法での走行実験結果を、それぞれ走行 1 周分の実験結果を示す。なお、走行経路の結果は、GPS コンパスにより取得した値を示している。

図 7 の結果から、直線経路追従法で走行した場合、走行経路から最大 $2[\text{m}]$ 程度の誤差で目標経路を追従することがわかる。一方、図 8 の結果から、Pure Pursuit 法で走行した場合、走行経路から最大 $0.5[\text{m}]$ 程度の誤差で目標経路を追従することがわかる。

5.4 考察

今回の実験では、直線経路追従法よりも、Pure Pursuit 法を用いた走行手法の方が走行経路と目標経路の誤差が小さくなった。

直線経路追従法では、調整すべき制御ゲインとして、 k_η 、 k_ϕ 、 k_Ω に加えて、目標点を切り替える範囲があるため、4 つのパラ

メータを設定しなければならない。そのため、4つのパラメータを最適に設定できた際には、経路の追従性が向上すると考えられる。しかし、今回の実験で実機を用いた場合、設定には多大な時間と労力がかかる。よって、実機の運動を再現できるシミュレータや、モックアップを用いたパラメータを設定する必要があると考えられる。さらに、直線追従の点をおよそ1[m]の間隔で設定し、円弧を作成したことが、円弧を追従する際に誤差が大きくなる要因の一つになっていると考えられる。

Pure Pursuit法では、目標とする点までの距離を調整する必要があるが、設定するパラメータは1つとなる。したがって、設定にかかる時間と労力を削減できるため、実機を用いたパラメータ設定に適していると考えられる。

また、今回の実験ではGPSで計測した値を走行経路としている。GPSでの計測値には、一定の誤差が含まれていると考えられる。そのため、今後の実験では、走行経路の真値を計測し、比較を行う必要がある。

6 結言

本研究では、地方の中小建設会社が容易に自動化技術を導入するため、簡易的な機器改造による自動走行を実現する際に、要求される機能の検討と実装を行った。また、機器を実装したダンプトラックで自動走行を実現し、目標経路とGPSで推定された位置の比較を行うことで、0.5[m]以内の誤差で目標経路を追従できたことを確認した。

今後は、ダンプトラックの自律走行および実際の施工現場への導入を目指す。地方の中小建設会社が工事を行う環境は、施工が進行するたびに環境が変化する施工現場である。そのため、事前に得られる地図情報が、使用できなくなる恐れがある。特に走行路面が変動すると、走行が不可能となり、大事故につながる可能性がある。また、施工現場には作業中の車両や作業員が点在する。それらに衝突するような事故は避けるべきである。さらに、常に十分な走行領域が確保されているとは限らず、限られた走行範囲で対向車両との行き違いを行う必要がある。

上述の課題の解決を目的とし、環境情報を取得して走行の安全性を担保するため、走行路面上に発生した穴や崖および、対向車両を含む障害物検知を認識するための実験を今後行う予定である。また、実際の施工現場での実験を行い、自律運転の実現を目指す。

謝辞：本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「エネルギー・環境新技術先導プログラム 劣悪環境下での作業機械のロボット化技術の開発」からの委託により実施されたものです。

参考文献

- [1] 建設業を取り巻く情勢・変化. <https://www.mlit.go.jp/common/001121700.pdf>, 2016.
- [2] 建設業での労働災害の発生状況. https://www.kensaibou.or.jp/activity/publicity_work/pdf/h28_enforcement_plan/h28_enforcement_plan05.pdf, 2016.
- [3] Satoru Miura, Izuru Kuronuma, and Kenniti Hamamoto. Next generation construction production system: On automated construction machinery.
- [4] 茂木正晴, 山元弘. 無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動. 計測と制御, Vol. 55, No. 6, pp. 495–500, 2016.
- [5] 永谷圭司, 今野陽太, 大野和則, 鈴木高宏, 鈴木太郎, 柴田幸則, 浅野公隆, 小松智広, 小栗裕治. 中小建設会社が導入可能な六輪ダンプトラックの自動走行に関する研究開発. 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 1013–1016, December 2017.
- [6] 豊田晃央. 災害復旧用ゴム人工筋肉駆動型遠隔操縦ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 8, pp. 600–606, 2015.
- [7] Shigeki Iida and S Yuta. Vehicle command system and trajectory control for autonomous mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems '91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop on*, pp. 212–217. IEEE, 1991.
- [8] Hiroki Ohta, Naoki Akai, Eijiro Takeuchi, Shinpei Kato, and Masato Eda. Pure pursuit revisited: Field testing of autonomous vehicles in urban areas. In *Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications (CPSNA), 2016 IEEE 4th International Conference on*, pp. 7–12. IEEE, 2016.
- [9] 米田完, 坪内孝司, 大隅久. はじめてのロボット創造設計. 講談社, 2001.