631 荷台水平維持機能を持つ移動台車の製作と実験

Development of a Cart With a Loading-Platform Leveling Control System

○学 鹿沼 圭史 (群馬大) 森 雄太 (群馬大) 正 安藤 嘉則 (群馬大)
正 村上 岩範 (群馬大) 正 山田 功 (群馬大)

Keishi Kanuma, Gunma University, Tenjincho, 1-5-1, Kiryu, Gunma
Yuta Mori, Gunma University
Yoshinori Ando, Gunma University
Iwanori Murakami, Gunma University
Kou Yamada, Gunma University

It is necessary to be able to carry a load to any kind of place by transportation vehicle safely. For that purpose load-carrying platform horizontal level-keeping performance is significant on a transportation vehicle. However, a vehicle does not have a platform level-keeping function generally. Such a vehicle needs to have enough traveling performance also.

Therefore it is aimed that the stability of the load-carrying platform on level-keeping. We confirm the performance with an experiment machine that has leveling control with the signal of the acceleration sensor in traveling.

Key Words : leveling control system, simulation model, experiments with the prototype machine

A 1. 緒言

運搬車両において安全かつ作業効率の向上を図るためには、普通の平地（一般道等）における高い走行性能に加えて、足場の悪い路面を走行することのできる不整地走行性能、山間部の斜面や岩場を登ることのできる登坂性能、いかなる場所においても積荷を安全に運搬するために荷台水平維持性能が求められると考えられる。

そこで本研究では、荷台水平維持性能に着目し、悪路や不整地、斜面等においても荷台の水平状態を保持することのできるシステムの構築を目的として研究を重ねてきた。

今回はこれまでに製作した荷台の位置制御を行うための機構をトラックなどの一般的な車両にも搭載可能な機構に改良し、これを製作する。そして、卓上での実験から製作した荷台の応答性を調べ、その有用性を検証する。さらに荷台傾斜角を検出するために荷台に加速度計を搭載し、その加速時計の信号を用いて、実験機が走行中に制御を行うことにより荷台の水平維持を実現させることを目的とする。

A 2. 実験装置

実験機を製作するに当たり走行実験機の台車部と水平維持機構を改良した荷台部を製作する (Fig.A1)。

台車は、実際に平地も走行可能であることおよび普通自動車に近い機構をもつことを考慮し、4輪を持つ移動台車とした。この台車は、前輪の左右のタイヤを独立したDCモータで駆動し、後輪を非駆動輪とした前輪駆動車である。

荷台の機構は、定常的に力を発生しなくても重力による降下がないようにねじとナットによって荷台を支持し、ねじが回転したときのみ荷台の前後が上下に変位する機構とするため、荷台の前後にパンタグラフジャッキと同様の機構を選択した。

A 3. 走行時における荷台水平維持実験

荷台の動作実験や、加速度計を取付けての荷台の水平維持実験を行い、水平維持性能の有用性を確認した。その後、実際に荷台を台車に搭載させ傾斜路（傾斜角約4[deg]）を走行させ、荷台を水平に制御させる実験を行った。

ここで、製作した荷台の機構はPC内で加速度計の出力から荷台の傾きを求め、目標値を設定、PID制御により指令

電圧をモータドライバに与える。その指令電圧は、モータへの印加電流に変換され、モータが回転する。これによりねじが回転し、ジャッキを上下に変位させる機構である。

傾斜走行時に制御を行う場合と無制御の場合の2通りの実験を行い両者の制御結果について比較し、Fig.A2に示す。

Fig.A2より、無制御時のスロープの傾斜角である4[deg]付近から、荷台を制御することで0[deg]付近に維持できていることがわかる。

A 4. 結言

本研究では、荷台水平維持機能を持つ移動台車の開発に当たり製作した走行実験機に加速度計を搭載し、荷台の角度を検出し、検出した信号に基づいて荷台水平維持制御を行うことを目的とし、荷台の機構の開発を行った。さらに、検出した傾きに応じて荷台の制御が正しく行われているかを確認し、水平維持に有用な荷台の機構を開発することができた。

Fig. A1 Experimental Vehicle

Fig. A2 Result of Experiment

1. 緒言

運搬車両において安全かつ作業効率の向上を図るためには、普通の平地（一般道等）の走行性能に加えて、足場の悪い路面を走行することのできる不整地走行性能、山間部の斜面や岩場を登ることのできる登坂性能、いかなる場所においても積荷を安全に運搬するために荷台水平維持性能が求められると考えられる。

しかし、トラックのような一般的な車両においては、平地における高い走行性能を持っているが、荷台水平維持機能を持つものではない。また、山間部の作業現場における大型の作業機械では、その走行装置部をクローラや多脚タイプにするなど高い登坂性能と荷台水平維持性能を持つことで、急斜面や障害物が多く不安定な作業現場に対応しているが、平地においての十分な走行性能を持つものは少ない。

そこで、本研究では特に荷台水平維持性能に着目し、これまでも荷台水平維持性能に関する研究を行ってきた。本研究では、平成16年度までに、悪路や不整地、斜面等においても荷台の水平状態を保持することのできるシステムの構築を目的とし、横置き型の実験機で模擬的な実験を行い、目的が達成可能であることを示してきた。平成17年度からは実際の運搬車両に近い実験機での実験を行うため、実際に走行する走行実験機を製作し、荷台の位置制御を行うための機構を考え、水平維持機能を持つ荷台を実験機に組み込んだ。

今回はこれまでに製作した荷台の位置制御を行うための機構をトラックなどの一般的な車両にも搭載可能な機構に改良し、これを製作する。そして、卓上での実験から製作した荷台の応答性を調べ、その有用性を検証する。さらに荷台傾斜角を検出するために実験機の荷台に加速度計を搭載し、その加速度計の信号を用いて、走行中に制御を行うことにより荷台の水平維持を実現させることを目的とする。

2. 実験装置の製作

実験機を製作するに当たり走行実験機と水平維持機構を改良した荷台部を製作する。

走行実験機は、実際に平地も走行可能であることおよび普通自動車に近い機構をもつことを考慮し、4輪を持つ移動台車とした。この台車は、前輪の左右のタイヤを独立したDCモータで駆動し、後輪を非駆動輪とした前輪駆動車である。車体とタイヤの間には、車体を支持するためのコイルばねがある。

荷台の機構は、本研究では左右方向のロールは考えず、前後方向のピッチングに対してのみ荷台を水平にする機構とした(Fig.1,2)。また、重力に対して荷台の位置を保つために常にモータによる力で保持することは、モータにとってあまりいいことではない。そこで、定常的に力を発生しなくても重力による降下がないようにねじとナットによって荷台を支持し、ねじが回転したときのみ荷台の前後が上下に変位する機構が必要である。今回、荷台の前後にパンタグラフジャッキと同様の機構を選択し、その機構が必要とするスペースを車体上部から荷台下部までとした。なお、今年度も水平維持可能な最大傾斜を30[deg]程度までとする。

荷台の水平維持機構に用いるパンタグラフジャッキは以下のように構成されている。Fig.4に示すように、4個のリンクには、30[mm]×165[mm]×8[mm]の①アルミ合金

Fig.1 Experimental Vehicle

Fig.2 Photo of the Jack

Fig.3 Photo of the slider

Fig.4 Connecting part

のフレームを2枚ずつ使用した。このリンクを②ベアリングと③シャフトを用いて、それぞれのリンクとA土台（上部）、Bナット、C土台（下部）、Dモータ連結部を連結させる。土台には④歯車を使用し、2つのリンクが同期して回転運動できるようにする。ナットとモータ連結部にはM10の⑦長ねじを連結させる。さらに、⑧カップリングを用いて長ねじと⑨モータを連結させる。このモータにより長ねじを回転させることでリンクが回転し、ジャッキの高さを変えることができる機構を製作した。実験時には初期位置までジャッキを移行させるため、リンクの片側に⑩ポテンショメータを取り付けて、長ねじとリンクとの角度を検出する。

荷台には、600[mm]×450[mm]×3[mm]のアルミ板を使用し、荷台と荷台水平維持機構をベアリングとシャフトを用いて連結させる。水平維持機構を荷台に連結させる際、荷台が初期状態から少しでも傾くと、前後の取り付け位置間の距離が長くなるという問題がある。荷台の後方にはスライドガイド (Fig.3) を取り付けることで解決した。

3. 予備実験

3・1 荷台の動作実験

(1) 目的と方法

製作した荷台の水平維持機構の機能を確認するため、荷台の動作実験を行う。

また、不整地での走行を想定したとき、路面の凸凹による振動が荷台に伝わり、荷台には振動した信号が入力されることが考えられる。そのため、荷台はどのような信号を入力されても、その信号に応じて動作することが必

要とされる。したがって、荷台の動作実験では目標値にステップ入力と正弦波を入力信号として与えて、その応答性を確かめる。

実験では荷台前後軸の上下方向の変位についてPC内で目標値を設定し、目標値や誤差に応じてPID制御により指令電圧をモータドライバに与える。その指令電圧は、モータへの印加電流に変換され、モータが回転する。これによりねじが回転し、ジャッキを上下に変位させる。まず、荷台の前後が現在の位置から基準とする位置（初期位置）まで変位し、その後、初期位置から上下方向に目標値まで変位する。このとき、初期位置までは、前後軸の各ジャッキの第2関節に取り付けたポテンショメータで、ねじ（水平軸）とリンクABのなす角度を検出し、その角度が設定した初期角（ $=38.5[\text{deg}]$ ）になるまでPID制御を行う。そして、初期位置からは、モータに内蔵されたエンコーダによりモータの回転角を検出する。長ねじのピッチが $0.0015[\text{m}]$ 、リンクの長さが $0.14[\text{m}]$ であることから、そのモータの回転角を前後軸の上下方向の変位量 $Y[\text{m}]$ に換算する。その変位量と目標値との偏差に応じてPCから電流指令値をモータドライバに与えて、モータを動かし、荷台の制御を行う。

ステップ入力では、目標値を $0.025[\text{m}]$ とし、前後軸で同等のゲイン($P=100$, $D=5$, $I=60$)を設定する。この設定で、荷台の前後軸を片方ずつ上下方向に変位させた。荷台の上下方向の変位量 $Y[\text{m}]$ について前軸、後軸それぞれの比較をFig.3.1, Fig.3.2に示す。ここで、図中の値は絶対値とし、下方向に変位するときの変位量 $Y[\text{m}]$ も上方向のときと同様に正の値で示している

さらに、振幅 $0.020[\text{m}]$ の正弦波を入力信号として与え、その正弦波による目標変位に対して、荷台の変位量、追従性をみる。ただし、実験は片方の軸を動作させ、他方を固定して前軸後軸の両軸で行う。また、前後軸で同じゲイン($P=150$, $D=3$, $I=30$)を用いる。

Fig.5 Displacement of the platform (Front-PID)

Fig.6 Comparison of the displacement of the front side

荷台の上下方向の変位量 $Y[\text{m}]$ について前軸のみについてそれぞれの比較をFig.5,6に示す。

(2) 実験結果

Fig.5より、実験ではPID制御によりステップ入力による目標の傾きを荷台に与えることができていたため、製作した機構は斜面の傾きに対して、荷台を水平にできると考えられる。ただし、下方向の変位は目標値を最大で $0.0008[\text{m}]$ 行き過ぎたあと制御時間内では戻らなかったが、これは目標値の3%程度であり、実用上問題ないと思われる。また、立ち上がりから、変位が落ち着くまでのグラフの傾きが直線的である。これは、荷重をねじで支えているため、ねじにおける摩擦がとて大きいことなどにより、大きなトルクが必要となるが、モータの出力が飽和しているためと思われる。さらに、前軸と後軸では変位量や動作に差はほとんどなかったため、後軸のスライダ機構は荷台の動作に影響しないと考えられる。

Fig.6より、荷台は目標とする正弦波の入力信号に追従していることがわかる。しかし、前軸の変位量は最大で $0.0186[\text{m}]$ 、後軸の変位量は最大で $0.0189[\text{m}]$ であった。これは目標変位とする $0.02[\text{m}]$ までは達していない。これはジャッキを動かすにいたるまでに若干の遅れが生じる。これにより、正弦波の入力を得てジャッキが目標変位に到達する前に、入力信号が逆の傾きになり、モータは逆回転を始める。よって、ジャッキは目標変位に達する前にモータが逆回転を始め変位するために偏差が生じてしまう。

3・2 加速度計の動作特性

(1) 用いた加速度計

製作した荷台は任意の傾きを与えられることがわかったが、水平を維持するためには、荷台の角度を検出し、その信号に基づいて荷台の制御を行う必要がある。そこで、荷台の中央に加速度計を取り付けた。ここでは、以下に示す方法で実験を行い、加速度計の動作特性について考察する。

また、今回実験に用いた加速度計は東京計器株式会社製サーボ加速度計TA-25である。この加速度計は広い計測周波数範囲においてすぐれた分解能と精度を持っており、 $0[\text{Hz}]$ から計測することが可能であるため、重力加速度を計測することにより傾斜を計測することが可能である。

加速度計のデータを検出したところまた、高周波域のノイズを含んでおり、これらを除去するため、2次のバター型ローパスフィルタを用いた。

加速度計を荷台に取り付け、荷台傾き5度間隔で加速度計から出力される電圧とポテンショメータの電圧の変化から角度を計算し比較することで、荷台の静止時に加速度計が正確に角度を検出しているかを確認する。ただし、目盛り付きの水平器を見ながら手でジャッキを約5度間隔で動かす。ジャッキは前軸のみを使用し、測定範囲は -10 度から $+15$ 度とする。

さらに、荷台に目標変位 $0.02[\text{m}]$ のステップ入力を与えたとき、加速度計から出力される電圧とポテンショメータの電圧の変化から角度を算出し比較することで、荷台の動作時に加速度計が正確に角度を検出しているかを確認する。ただし、ここでは前軸のみ動作させる。

加速度計の出力とローパスフィルタを用いた出力の比較(Fig.7)と、荷台の静止時における加速度計とポテンショメータによる角度の比較(Fig.8)、さらに荷台の動作時における比較(Fig.9)結果をそれぞれ示す。

(2) 実験結果

Fig.7より、加速度計の出力を近似したものと、ローパスフィルタを通した後の出力は安定状態となった後、一致している。これにより、ローパスフィルタを通して加速度計の出力の定常値に誤差を生じないことがわかる。しかし、約0.3[sec]の時間の遅れを生じている。これは、ローパスフィルタを通したことが原因と考えられる。

Fig.8より荷台静止時において加速度計から得た角度とポテンショメータから得た角度は、ほぼ等しいことがわかる。両方の角度の最大の誤差は0.03[deg]で変位に直すと0.002[m]であり、実用上問題ないと思われる。

Fig.9より荷台動作時において、定常になった時のポテンショメータによる角度は6.48[deg]、加速度計による角度は6.49[deg]であった。微小の差があるもののほぼ等しいといえる。角度の推移はほぼ等しいことがわかる。また、荷台が動作したことでかかる加速度はほとんど検出されず、重力加速度の検出だということがわかる。

以上より、加速度計は静止時、動作時において荷台の傾きに応じた角度を検出することが確認された。よって、これからの荷台の水平制御実験に加速度計が使用できると判断した。

3・3 荷台の水平維持実験

(1) 目的と方法

荷台に初期角度を与えた状態から水平になるように制御し、その状態を維持できるかを検討、考察する。

初期状態の設定に、目盛りつきの水平器を見ながらねじを手動で回し、ジャッキの前後軸の一方を固定し、他方のみにそれぞれ約±5度の角度を与える。その後、傾斜角度を加速度計から検出し、ローパスフィルタに通した後に変位に変換する。その変位が0となるようにPID制御を行い、荷台を水平に制御する。なお、前後軸で同じゲイン($P=80$, $D=8$, $I=15$)を用いる。

この設定で、次の各場合について実験を行う。

- 荷台を約+5度傾け、前軸のみの変位で水平にさせた場合。
 - 荷台を約-5度傾け、前軸のみの変位で水平にさせた場合。
 - 荷台を約+5度傾け、後軸のみの変位で水平にさせた場合。
 - 荷台を約-5度傾け、後軸のみの変位で水平にさせた場合。
- 前軸における実験結果をFig.10,11に示す。

(2) 実験結果

Fig.10より、荷台の傾き角 θ について約1秒後には、角度がほぼ0度になり、最終的には-0.08[deg]に落ち着いている。また、ポテンショメータから算出した変位が目標変位まで到達しているので、水平制御できているといえる。

荷台の傾き角 θ について約1秒後には、角度が0度に近づいているが、偏差が残ってしまっている。この制御実験は前軸における上方向への変位で水平にしている。上方向に変位させるときは、重力に対して逆らって荷台を変位させるので、ねじにより大きな負荷がかかり、モータにもより大きな不可がかかる。これが偏差を生じさせた原因だと考えられる。しかし、I制御により、時間の経過とともに偏差が小さくなっていることも伺え、5秒後には-0.07[deg]まで落ち着いている。

荷台の傾き角 θ について約1秒後には、角度がほぼ0度になり、最終的には0.04[deg]に落ち着き、水平制御できているといえる。

荷台の傾き角 θ について約1秒後には、角度が0度に近い

Fig.7 Comparison of having low pass filter

Fig.8 Comparison of the angle

Fig.9 Comparison of the angle

Fig.10 The response of the angle at upper direction

Fig.11 The response of the angle at down direction

値になっているが、偏差が残ってしまっている。これは、前軸における上方向での水平維持制御と同様の結果となっている。この原因も重力によるものと考えられる。また、I制御により、時間の経過とともに偏差が小さくなっていることも伺え、5秒後には0.11[deg]まで落ち着いている。

したがって、前軸後軸は上方向の水平の制御、下方向の水平の制御ともに同じ特性が見られた。しかし、上方向の水平維持制御、下方向の水平維持制御では違いが見られた。下方向の水平維持制御では約1秒後には水平を維持できたが、重力の影響より、上方向の水平維持制御では偏差が残ってしまった。しかし、前軸後軸ともにI制御により偏差を小さくできている。

4. 台車走行時における荷台の水平維持実験

(1) 目的と方法

これまでの実験を踏まえ、荷台を台車に装着し実際走行している中で、荷台を水平に制御できているかを確認する。

台車を約4[deg]の傾斜のついたスロープで上りと下りを走行させ、データを取る。ただし、台車と傾斜が始まるまでの距離を0.5[m]として実験を行う。また、次の2つの実験を上りと下りの両方で行う。

- 1) 走行中に水平維持制御をさせる。
- 2) 走行前に水平に制御させ、その後水平維持制御を行わずに走行させる。

上記の2つの実験の角度を比較することで、スロープ走行中に荷台が水平になっているかを確認する。

(2) 実験結果

水平維持制御を行わなかったときにはスロープの角度に近い4[deg]前後の値が出ている。多少上りと下りで角度に差があるのは、スロープの上下の平地に多少の角度がついているからである。また、走行時に水平維持制御を行ったときの角度の変化は、振動が激しくなっている。これは、路面の凸凹の影響によるものだと考えられる。しかし、角度は0度付近を振動していることがわかり水平が維持できているといえる。振幅においては、水平維持制御を行わなかったときが約1[deg]であるのに対して水平維持制御を行ったときは約4[deg]にもなった。これは台車が走行することで生じる振動に加えて、荷台が水平に維持しようとすることで振動を増幅してしまったためと考えられる。

Fig.12 Comparison of presence of control in an uphill direction

5. 結言

本研究では、荷台水平維持機能を持つ移動台車の開発に当たり、昨年度までに製作した走行実験機に加速度計を搭載し、荷台の角度を加速度計で検出し、その検出した信号に基づいて荷台水平維持制御を行うことを目的とした。さらに、検出した傾きに応じて荷台の制御が正しく行われているかを確認した。

まず、加速度計を搭載するにあたり、荷台の制御に使用する加速度計から出力される値が信頼できるものかを確認するために、特性を調べた。ノイズがひどかったためローパスフィルタに通した後に、ポテンショメータの角度の変化と比較したところ、静止時、動作時にほぼ等しい値が得られた。したがって、加速度計を角度検出用センサとして使用できることが確認された。

また、荷台に振幅0.02[m]の正弦波を入力として与え、動作特性を確認した。結果は、前軸で0.0014[m]、後軸で0.0011[m]の偏差が生じたが、追従性が確認できた。よって、荷台制御系の有用性が確認できた。

つぎに、荷台に初期角度を与え水平になるかどうかの水平維持実験を行った。重力の影響により上方向の応答には偏差が生じたが、I制御の効果より時間の経過とともに偏差が小さくなっていることが確認された。

最後に実際に荷台を台車に装着させ傾斜路を走行させ、荷台を制御させる実験を行った。この実験では、傾斜走行時に制御を行う場合と制御を行わない場合の2通りの実験を行い両者の制御結果について比較した。その結果、路面の凸凹の影響からくと思われる振動があるものの制御により水平を維持できていることがわかった。

以上のことから、実験によって加速度計から検出された角度を用いて制御を行っても水平維持ができることがわかった。また、荷台を台車に装着させた状態で傾斜を走行させても、荷台の応答が発散せずに水平維持できることがわかった。

参考文献

- (1) 安藤他；林業ベースマシンの開発，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会－2006桐生一講演論文集，pp.85-86

Fig.13 Comparison of presence of control in an uphill direction