

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7424731号  
(P7424731)

(45)発行日 令和6年1月30日(2024.1.30)

(24)登録日 令和6年1月22日(2024.1.22)

(51)Int. Cl. F I  
*E 0 1 C 23/01 (2006.01)* E 0 1 C 23/01  
*G 0 1 C 7/04 (2006.01)* G 0 1 C 7/04

請求項の数 9 (全 35 頁)

(21)出願番号	特願2021-178967(P2021-178967)	(73)特許権者	301031392
(22)出願日	令和3年11月1日(2021.11.1)		国立研究開発法人土木研究所
(65)公開番号	特開2023-67581(P2023-67581A)		茨城県つくば市南原1番地6
(43)公開日	令和5年5月16日(2023.5.16)	(73)特許権者	390019998
審査請求日	令和5年2月21日(2023.2.21)		東亜道路工業株式会社
			東京都港区六本木7-3-7
特許法第30条第2項適用	・令和3年10月14日、 第34回日本道路会議の論文・事例報告集(論文番号: 3030) ・令和3年10月14日、第34回日本道 路会議の論文・事例報告集(論文番号:3031) ・ 令和3年10月14日、第34回日本道路会議の論文・ 事例報告集(論文番号:3033) ・令和3年10月 14日、第34回日本道路会議の論文・事例報告集(論 文番号:3034)	(73)特許権者	597010628
			協立電機株式会社
			静岡県静岡市駿河区中田本町61番1号
		(73)特許権者	504171640
			電子技研工業株式会社
			神奈川県横浜市長北区新吉田町190
		(73)特許権者	000135771
			株式会社パスコ
			東京都目黒区下目黒一丁目7番1号
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 たわみ計測方法、たわみ計測システム、および、たわみ計測プログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に計測するたわみ計測方法であって、  
 車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、たわみ速度を含む車両走行面  
 との相対速度を検出する複数のドップラー振動計とが剛結されたセンサ架台が剛結された  
 載荷用車両を走行させるステップと、

前記載荷用車両の走行中に、前記仰角変動計および前記複数のドップラー振動計から測  
 定値を取得するステップと、

前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から  
 車両の上下動に由来する変動速度を除去するステップと、

前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および前記仰角変動計から取得さ  
 れた車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する  
 変動速度を除去するステップと

前記車両の上下動に由来する変動速度および車両の仰角変動に由来する変動速度が除去  
 されたたわみ速度から最大たわみ量を算出するステップと、を含むことを特徴とするたわ  
 み計測方法。

【請求項2】

前記最大たわみ量を算出するステップは、

wをたわみ量とし、Vを前記載荷用車両の走行速度とし、xを距離とし、

tを時間とし、dw/dtをたわみ速度とし、aを最大たわみ量とし、bをたわみ形状に

関する係数とし、 $d$ を最大たわみの発生位置とすると、以下の数式(F1)、(F2)を用いて最大たわみ量 $a$ を算出することを特徴とする請求項1記載のたわみ計測方法。

【数1】

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad \dots(F1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -2ab(x-d) \cdot e^{-b(x-d)^2} \\ \frac{dw}{dx} &= -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \\ \frac{dw}{dt} &= 2abV(x-d)e^{-b(x-d)^2} \end{aligned} \right\} \dots(F2)$$

【請求項3】

前記最大たわみ量を算出するステップは、

$w$ をたわみ量とし、 $x$ を距離とし、 $a$ を最大たわみ量とし、 $b$ をたわみ形状に関する係数とし、 $d$ を最大たわみの発生位置とすると、以下の数式(F3)、(F4)を用いて最大たわみ量 $a$ を算出することを特徴とする請求項1記載のたわみ計測方法。

【数2】

$$w = \frac{a}{1 + b(x-d)^2} \quad \dots(F3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -\frac{2ab(x-d)}{\{1 + b(x-d)^2\}^2} \\ \frac{dw}{dx} &= -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{2abV(x-d)}{\{1 + b(x-d)^2\}^2} \end{aligned} \right\} \dots(F4)$$

【請求項4】

たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に計測するたわみ計測システムであって、  
 載荷用車両に剛結されるセンサ架台と、

前記センサ架台に剛結され、車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、

前記センサ架台に剛結され、たわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する複数のドップラー振動計と、

前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から車両の上下動に由来する変動速度を除去すると共に、前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および前記仰角変動計から取得された車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去し、前記車両の上下動に由来する変動速度および車両の仰角変動に由来する変動速度が除去されたたわみ速度から最大たわみ量を算出する演算部と、を備え、

前記複数のドップラー振動計は、前記載荷用車両のいずれかの車輪の車両進行方向に対する前方または後方の少なくとも一方においてたわみ速度を含む車両走行面との相対速度

を検出する位置に設けられていることを特徴とするたわみ計測システム。

【請求項 5】

前記複数のドップラー振動計のうち、少なくとも一つは、前記車輪の車両進行方向に対する前方のたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する位置に設けられ、残りの一つ以上は前記車輪の車両進行方向に対する後方のたわみ速度を含む車両走行面の変動速度を検出する位置に設けられていることを特徴とする請求項 4 記載のたわみ計測システム。

【請求項 6】

前記仰角変動計は、ジャイロセンサ、変位計、および、傾斜計のいずれかであることを特徴とする請求項 4 または請求項 5 に記載のたわみ計測システム。

10

【請求項 7】

載荷用車両に剛結されるセンサ架台と、前記センサ架台に剛結され、車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、前記センサ架台に剛結され、たわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する複数のドップラー振動計と、を含むたわみ計測装置によって、たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に測定して得られた測定値を用いて、最大たわみ量を算出するたわみ計測プログラムであって、

前記たわみ計測装置から前記測定値を取得する処理と、

前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から車両の上下動に由来する変動速度を除去する処理と、

前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および前記仰角変動計から取得された車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去する処理と、

20

前記車両の上下動に由来する変動速度および車両の仰角変動に由来する変動速度が除去されたたわみ速度から最大たわみ量を算出する処理と、を含むことを特徴とするたわみ計測プログラム。

【請求項 8】

前記最大たわみ量を算出する処理は、

$w$  をたわみ量とし、 $V$  を前記載荷用車両の走行速度とし、 $x$  を距離とし、

$t$  を時間とし、 $dw/dt$  をたわみ速度とし、 $a$  を最大たわみ量とし、 $b$  をたわみ形状に関する係数とし、 $d$  を最大たわみの発生位置とするとき、以下の数式 (F5)、(F6) を用いて最大たわみ量  $a$  を算出することを特徴とする請求項 7 記載のたわみ計測プログラム。

30

【数 3】

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad \dots(F5)$$

$$\frac{dw}{dx} = -2ab(x-d) \cdot e^{-b(x-d)^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots(F6)$$

$$\frac{dw}{dt} = 2abV(x-d)e^{-b(x-d)^2}$$

【請求項 9】

前記最大たわみ量を算出する処理は、

$w$  をたわみ量とし、 $V$  を載荷用車両の走行速度とし、 $x$  を距離とし、 $t$  を時間とし、

$dw/dt$  をたわみ速度とし、 $a$  を最大たわみ量とし、 $b$  をたわみ形状に関する係数とし

、 $d$ を最大たわみの発生位置とすると、以下の数式(F7)、(F8)を用いて最大たわみ量 $a$ を算出することを特徴とする請求項7記載のたわみ計測プログラム。

【数4】

$$w = \frac{a}{1 + b(x - d)^2} \quad \dots(F7)$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{2ab(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots(F8)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{2abV(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、たわみ計測方法、たわみ計測システム、および、たわみ計測プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

舗装は、車両の走行等に伴う繰り返し荷重による路盤、路床の損傷、地震動のような偶発的な作用、または地下水の影響等により、路盤、路床、路体に空洞や不等沈下といった変状が生じる場合がある。そのため、わだち掘れやひび割れ等の破損だけでなく、舗装の支持力を計測することで、こうした変状を把握し、舗装の健全度を維持していく必要がある。このため、舗装の支持力を非破壊的に計測する舗装の健全度評価方法が従来から求められている。

30

【0003】

舗装の健全度評価に用いられる非破壊式計測機として、重錘落下式たわみ計測機であるFWD(Falling Weight Deflectometer:以下、単に「FWD」という。)が広く用いられている。しかしながら、FWDは静止状態で測定する必要があることから、交通規制が必要であるとともに、測定に時間を要する。そのため、広域に亘る舗装全体の健全度を評価するには、莫大な時間と費用を伴う。また、連続的な測定が困難であることから、局所的な変状を見落としてしまう恐れがある。

【0004】

このような事情に鑑みて、特許文献1では、載荷用車両(以下、単に「車両」ということもある)を走行させながら舗装のたわみ速度を非破壊的に計測できる動的たわみ計測装置(MWD:Moving Wheel Deflectometer:以下、単に「MWD」という。)が提案されている。MWDは、連続的に車両走行面に発生するたわみを速度信号として測定可能であり、効率的に舗装の健全度を評価可能な一方で、走行させながら測定するため、測定値である速度信号に車両の動きに由来する速度が含まれてしまう。そのため、測定値から車両の動きに由来する速度を除去する必要がある。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2016-23537号公報

50

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

上述した特許文献1に記載のたわみ計測方法では、測定値から車両の動きに由来する速度の除去を試みている。車両の動きに由来する速度には車両の上下動に由来する変動速度と車両の仰角変動に由来する変動速度等があるが、特許文献1では車両の仰角に由来する変動速度については明確に考慮されていない。また、特許文献1に記載のたわみ計測方法では解析手法にウェーブレット解析を用いているため、測定値からたわみ速度の一部が除去される可能性がある。このため、舗装の最大たわみ量をより正確に算出するための方法が求められていた。

10

## 【0007】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、測定値から車両の動きに由来する速度を効果的に除去することで、たわみ速度に関する物理量を抽出し、算出される最大たわみ量の確度向上を可能にした、たわみ計測方法、たわみ計測システム、および、たわみ計測プログラムを提供することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

(1) 上記の目的を達成するために、本発明は、以下のような手段を講じた。すなわち、たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に計測するたわみ計測方法であって、車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、たわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する複数のドップラー振動計とが剛結されたセンサ架台が、剛結された載荷用車両を走行させるステップと、前記載荷用車両の走行中に、前記仰角変動計および前記複数のドップラー振動計から測定値を取得するステップと、前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から車両の上下動に由来する変動速度を除去するステップと、前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および、前記仰角変動計から取得された車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去するステップと、前記車両の上下動に由来する変動速度と車両の仰角変動に由来する変動速度が除去されたたわみ速度に関する物理量から最大たわみ量を算出するステップと、を含むことを特徴とする。

20

## 【0009】

このように、本発明においては、複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度を除去することから、ドップラー振動計から取得された測定値から車両の上下動に由来する変動速度のみが除去されることとなり、算出される最大たわみ量の確度を向上させることができる。また、車両の上下動に由来する変動速度だけでなく、車両の仰角変動に由来する変動速度についても除去された値を用いて最大たわみ量が算出されることから、車両の仰角変動に由来する変動速度の除去を考慮していない場合と比較して、算出される最大たわみ量の確度をさらに向上させることが可能となる。

30

## 【0010】

(2) 本発明のたわみ計測方法において、前記最大たわみ量を算出するステップは、 $w$ をたわみ量とし、 $V$ を前記載荷用車両の走行速度とし、 $x$ を距離とし、 $t$ を時間とし、 $dw/dt$ をたわみ速度とし、 $a$ を最大たわみ量とし、 $b$ をたわみ形状に関する係数とし、 $d$ を最大たわみの発生位置としたとき、以下の数式(F1)、(F2)を用いて最大たわみ量 $a$ を算出することを特徴とする。

40

【数 1】

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad \dots (F1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -2ab(x-d) \cdot e^{-b(x-d)^2} \\ \frac{dw}{dx} &= -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \\ \frac{dw}{dt} &= 2abV(x-d)e^{-b(x-d)^2} \end{aligned} \right\} \dots (F2)$$

【0011】

このように、車両走行面のたわみ形状と類似するガウス関数を用いることから、ドップラー振動計から取得された測定値から最大たわみ量を算出することができる。また、車両の動きに由来する速度が除去された値から最大たわみ量を算出するため、算出される最大たわみ量の確度を向上させることが可能となる。

【0012】

(3) 本発明のたわみ計測方法において、前記最大たわみ量を算出するステップは、 $w$  をたわみ量とし、 $V$  を前記載荷用車両の走行速度とし、 $x$  を距離とし、 $t$  を時間とし、 $dw/dt$  をたわみ速度とし、 $a$  を最大たわみ量とし、 $b$  をたわみ形状に関する係数とし、 $d$  を最大たわみの発生位置としたとき、以下の数式(F3)、(F4)を用いて最大たわみ量  $a$  を算出することを特徴とする。

【数 2】

$$w = \frac{a}{1 + b(x-d)^2} \quad \dots (F3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -\frac{2ab(x-d)}{\{1 + b(x-d)^2\}^2} \\ \frac{dw}{dx} &= -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{2abV(x-d)}{\{1 + b(x-d)^2\}^2} \end{aligned} \right\} \dots (F4)$$

【0013】

このように、車両走行面のたわみ形状と類似する関数を用いることから、ドップラー振動計から取得された測定値から最大たわみ量を算出することができる。また、車両の動きに由来する速度が除去された値から最大たわみ量を算出するため、算出される最大たわみ量の確度を向上させることが可能となる。

【0014】

(4) 本発明のたわみ計測システムは、たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に計測するたわみ計測システムであって、載荷用車両に剛結されるセンサ架台と、前記センサ架台に剛結され、車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、前記センサ架台に剛結され、たわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する複数のドップラー

振動計と、前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から車両の上下動に由来する変動速度を除去すると共に、前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および前記仰角変動計から取得された車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去し、前記車両の上下動に由来する変動速度および車両進行方向の車両の仰角変動に由来する変動速度が除去されたたわみ速度に関する物理量から最大たわみ量を算出する演算部と、を備え、前記複数のドップラー振動計は、前記載荷用車両のいずれかの車輪の車両進行方向に対する前方または後方の少なくとも一方においてたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する位置に設けられていることを特徴とする。

**【0015】**

10

このように、本発明において、複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度を除去することから、ドップラー振動計から取得された測定値から車両の上下動に由来する変動速度のみが除去されることとなり、算出される最大たわみ量の確度を向上させることができる。また、車両の上下動に由来する変動速度だけでなく、車両の仰角変動に由来する変動速度についても除去された値を用いて最大たわみ量が算出されることから、車両の仰角変動に由来する変動速度の除去を考慮していない場合と比較して、算出される最大たわみ量の確度をさらに向上させることが可能となる。

**【0016】**

20

(5) 本発明のたわみ計測システムにおいて、前記複数のドップラー振動計のうち、少なくとも一つは、前記車輪の車両進行方向に対する前方のたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する位置に設けられ、残りの一つ以上は前記車輪の車両進行方向に対する後方のたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する位置に設けられていることを特徴とする。

**【0017】**

このように、複数あるドップラー振動計が、車輪の前方および後方のそれぞれに少なくとも一つずつ設けられることから、ドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度を除去した際に、たわみ速度の差が大きくなるため、正確な最大たわみ量の算出が可能となる。

**【0018】**

30

(6) 本発明のたわみ計測システムにおいて、前記仰角変動計は、ジャイロセンサ、変位計、および、傾斜計のいずれかであることを特徴とする。このように、仰角変動計がジャイロセンサ、変位計、および、傾斜計のいずれかから、載荷用車両における車両仰角の変動を測定することができる。また、仰角変動計がジャイロセンサである場合には、載荷用車両の角速度が直接測定できるため、測定値から角速度を算出する必要がある変位計および傾斜計と比較して、計算の手間を削減することができる。

**【0019】**

(7) 本発明のたわみ計測プログラムは、載荷用車両に剛結されるセンサ架台と、前記センサ架台に剛結され、車両進行方向の車両仰角の変動を検出する仰角変動計と、前記センサ架台に剛結され、たわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出する複数のドップラー振動計と、を含むたわみ計測装置によって、たわみが生じ得る車両走行面のたわみを動的に測定して得られた測定値を用いて、最大たわみ量を算出するたわみ計測プログラムであって、前記たわみ計測装置から前記測定値を取得する処理と、前記複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで、前記測定値から車両の上下動に由来する変動速度を除去する処理と、前記車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および前記仰角変動計から取得された車両進行方向の車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去する処理と、前記車両の上下動に由来する変動速度および車両の仰角変動に由来する変動速度が除去されたたわみ速度に関する物理量から最大たわみ量を算出する処理と、を含むことを特徴とする。

40

**【0020】**

50

このように、本発明において、複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度を除去することから、ドップラー振動計から取得された測定値から車両の上下動に由来する変動速度のみが除去されることとなり、算出される最大たわみ量の確度を向上させることができる。また、車両の上下動に由来する変動速度だけでなく、車両の仰角変動に由来する変動速度についても除去された値を用いて最大たわみ量が算出されることから、車両の仰角変動に由来する変動速度の除去を考慮していない場合と比較して、算出される最大たわみ量の確度をさらに向上させることが可能となる。

【 0 0 2 1 】

( 8 ) 本発明のたわみ計測プログラムにおいて、前記最大たわみ量を算出する処理は、 $w$ をたわみ量とし、 $V$ を前記載荷用車両の走行速度とし、 $x$ を距離とし、 $t$ を時間とし、 $dw/dt$ をたわみ速度とし、 $a$ を最大たわみ量とし、 $b$ をたわみ形状に関する係数とし、 $d$ を最大たわみの発生位置とするとき、以下の数式 ( F 5 )、( F 6 ) を用いて最大たわみ量  $a$  を算出することを特徴とする。

10

【 数 3 】

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad \dots(F5)$$

$$\frac{dw}{dx} = -2ab(x-d) \cdot e^{-b(x-d)^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots(F6)$$

$$\frac{dw}{dt} = 2abV(x-d)e^{-b(x-d)^2}$$

【 0 0 2 2 】

このように、車両走行面のたわみ形状と類似するガウス関数を用いることから、ドップラー振動計から取得された測定値から最大たわみ量を算出することができる。また、車両の動きに由来する速度が除去された値から最大たわみ量を算出するため、算出される最大たわみ量の確度を向上させることが可能となる。

30

【 0 0 2 3 】

( 9 ) 本発明のたわみ計測プログラムにおいて、前記最大たわみ量を算出する処理は、 $w$ をたわみ量とし、 $V$ を載荷用車両の走行速度とし、 $x$ を距離とし、 $t$ を時間とし、 $dw/dt$ をたわみ速度とし、 $a$ を最大たわみ量とし、 $b$ をたわみ形状に関する係数とし、 $d$ を最大たわみの発生位置とするとき、以下の数式 ( F 7 )、( F 8 ) を用いて最大たわみ量  $a$  を算出することを特徴とする。

【数 4】

$$w = \frac{a}{1 + b(x - d)^2} \quad \dots (F7)$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{2ab(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots (F8)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{2abV(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

【0024】

このように、車両走行面のたわみ形状と類似する関数を用いることから、ドップラー振動計から取得された測定値から最大たわみ量を算出することができる。また、車両の動きに由来する速度が除去された値から最大たわみ量を算出するため、算出される最大たわみ量の確度を向上させることが可能となる。

20

【発明の効果】

【0025】

本発明によれば、算出される最大たわみ量の確度を向上させることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図 1】たわみ曲線および最大たわみ量を模式的に説明する説明図である。

【図 2 A】設置角度を模式的に説明する説明図である。

【図 2 B】車両仰角を模式的に説明する説明図である。

【図 3】走行速度と最大たわみ発生位置との関係性を示すグラフである（松井邦人ほか，“走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国における取組み”，土木技術資料 5 2 - 1 2，2013 年より抜粋）。

30

【図 4】数式（1）と数式（19）の曲線形状を示すグラフである。

【図 5】本実施形態に係るたわみ計測装置の構成を示す模式図である。

【図 6】本実施形態に係るたわみ計測装置の変更例の一例を示した模式図である。

【図 7】本実施形態に係るたわみ計測装置の変更例の一例を示した模式図である。

【図 8】本実施形態に係るたわみ計測装置における仰角変動計の変更例の一例を示した模式図である。

【図 9】本実施形態に係るたわみ計測システムの概略構成を示すブロック図である。

【図 10】本実施形態におけるたわみ計測方法の流れを示すフロー図である。

40

【図 11】本実施形態に係る上下ひずみの差と車輪の荷重との関係式の一例を示すグラフである。

【図 12】実施例 1 における走行距離に対する車両仰角の変動について示すグラフである。

。

【図 13】実施例 1 における車両仰角の変動に対する  $\sin$  の変動を示すグラフである。

。

【図 14】実施例 1 における車両仰角の変動に対する  $\cos$  の変動を示すグラフである。

。

【図 15】実施例 2 におけるドップラー振動計の速度差および角速度を示すグラフである。

。

【図 1 6】実施例 3 におけるドップラー振動計の速度差および角速度を示すグラフである。

【図 1 7】実施例 4 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 1 8】実施例 5 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 1 9】実施例 6 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 2 0】実施例 7 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 2 1】実施例 4、実施例 8 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 2 2】実施例 9、実施例 1 0 および比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

10

【図 2 3】実施例 4 と比較例 1 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 2 4】比較例 1 と比較例 2 における最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。

【図 2 5】実施例 4 と比較例 1 との相関関係を示す散布図である。

【図 2 6】比較例 1 と比較例 2 との相関関係を示す散布図である。

【図 2 7】実施例 4 と実施例 5 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

【図 2 8 A】実施例 1 1 および実施例 1 2 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

【図 2 8 B】実施例 1 1 および実施例 1 2 における走行速度の測定結果を示すグラフである。

【図 2 9】実施例 1 3 および比較例 3 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

20

【図 3 0】実施例 1 4 および比較例 4 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

【図 3 1】実施例 1 5 および比較例 5 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

【図 3 2】実施例 4 および実施例 1 6 における最大たわみ量  $a$  の計測結果を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0027】

[最大たわみ量を算出する原理]

図 1 ~ 4 を参照して、ドップラー振動計の測定値に含まれる載荷用車両の動きに由来する速度と、それを考慮した最大たわみ量の算出方法の原理について説明する。図 1 は、たわみ曲線および最大たわみ量を模式的に説明する説明図であり、図 2 A は、ドップラー振動計の設置角度を模式的に説明する説明図であり、図 2 B は、車両仰角を模式的に説明する説明図である。また、図 3 は、走行速度と最大たわみ発生位置との関係性を示すグラフであり、図 4 は、数式 ( 1 ) と数式 ( 1 9 ) の曲線形状を示すグラフである。

30

【0028】

本実施形態では、車輪 1 の直下を原点とする局所座標系を定義する。この局所座標系では、載荷用車両 1 0 が走行する方向である車両進行方向 T D を  $x$  軸とし、車軸 1 a の延伸方向を  $y$  軸とし、車両走行面 V s に荷重がかかる載荷方向 L D を  $z$  軸とし、車両進行方向 T D を  $x$  軸の負の方向とし、載荷方向 L D を  $z$  軸の正の方向としている。

40

【0029】

図 1 は、載荷用車両 1 0 の走行時において、車輪 1 によって荷重がかけられた車両走行面 V s の断面図である。車両走行面 V s は、車輪 1 によって凹状のたわみ曲線  $w$  を描く。

【0030】

載荷用車両 1 0 が停止している場合、車軸 1 a の中心を通る鉛直線 A x 上にたわみ曲線  $w$  の頂点 P o が位置する。本発明では動的にたわみを計測するため、車軸 1 a の中心を通る鉛直線 A x よりも後方にたわみ曲線  $w$  の頂点 P o が位置する。このとき、局所座標系の原点と、たわみ曲線  $w$  の頂点 P o との間の距離を最大たわみ発生位置  $d$  とする。最大たわみ発生位置  $d$  は、「松井邦人ほか，“走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国におけ

50

る取組み”、土木技術資料55-12、2013年」の資料による。

【0031】

たわみ曲線  $w$  は、最大たわみ量を  $a$  とし、たわみ形状に関する係数を  $b$  とし、最大たわみ発生位置を  $d$  とし、距離を  $x$ 、走行速度を  $V$  としたとき、数式(1)によって、求められる。また、数式(2)によって、たわみ速度  $dw/dt$  が求められる。

【数5】

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad \dots(1)$$

$$\frac{dw}{dx} = -2ab(x-d) \cdot e^{-b(x-d)^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt}$$

$$\frac{dw}{dt} = 2abV(x-d)e^{-b(x-d)^2} \quad \dots(2)$$

【0032】

図2Aは、載荷用車両10が有する車輪1周辺に設けられたドップラー振動計LDVを模式的に示した模式図である。本実施形態では、1つのたわみ計測装置100に対して、車輪1の前方に1つ、後方に2つ、合計3つのドップラー振動計LDV1~3が設けられている場合について説明する。

20

【0033】

3つのドップラー振動計LDV1~3について、車両進行方向TDの前方から順に、第1のドップラー振動計LDV1、第2のドップラー振動計LDV2、第3のドップラー振動計LDV3とする。また、第1のドップラー振動計LDV1と第2のドップラー振動計LDV2との間に車輪1が配置されている。

【0034】

各ドップラー振動計LDV1~3は、照射口IP1~3から車両走行面Vsに対してレーザー光を照射する。ここで、ドップラー振動計LDV1において、設置角度 $\theta_{LDV1}$ とは、図2Aに示すように、二点鎖線で示すレーザー光と、レーザーの照射口IP1を通る鉛直線SPとの間の角度である。ドップラー振動計LDV1においてレーザー光の光路長 $r_1$ は、数式(3)によって示すことができ、光路長 $r_1$ を時間 $t$ で微分した値 $dr_1/dt$ については、数式(4)によって示される。また、 $r_1$ 同様に $r_2$ においては数式(5)(6)、 $r_3$ においては数式(7)(8)によって示される。

30

【数 6】

$$r_1 = \frac{-L_X \sin \theta_M + L_Z \cos \theta_M + (h - L_Z)}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} \dots (3)$$

$$\frac{dr_1}{dt} = -\frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{L_X \cos \theta_M + L_Z \sin \theta_M}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV1} + \theta_M)(L_Z - h + L_X \sin \theta_M - L_Z \cos \theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV1} + \theta_M)} \right\} \dots (4)$$

$$r_2 = \frac{-(L_X + L_{12}) \sin \theta_M + L_Z \cos \theta_M + (h - L_Z)}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} \dots (5)$$

$$\frac{dr_2}{dt} = -\frac{d\theta_M}{dt} \left[ \frac{(L_X + L_{12}) \cos \theta_M + L_Z \sin \theta_M}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \{L_Z - h + (L_X + L_{12}) \sin \theta_M - L_Z \cos \theta_M\}}{\cos^2(\theta_{LDV2} + \theta_M)} \right] \dots (6)$$

$$r_3 = \frac{-(L_X + L_{12} + L_{23}) \sin \theta_M + L_Z \cos \theta_M + (h - L_Z)}{\cos(\theta_{LDV3} + \theta_M)} \dots (7)$$

$$\frac{dr_3}{dt} = -\frac{d\theta_M}{dt} \left[ \frac{(L_X + L_{12} + L_{23}) \cos \theta_M + L_Z \sin \theta_M}{\cos(\theta_{LDV3} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV3} + \theta_M) \{L_Z - h + (L_X + L_{12} + L_{23}) \sin \theta_M - L_Z \cos \theta_M\}}{\cos^2(\theta_{LDV3} + \theta_M)} \right] \dots (8)$$

【0035】

このとき、光路長が  $r_1$  であり、測定時間が  $t$  であり、ドップラー振動計 LDV1 の照射口 IP1 から交点 I までの距離が  $L_X$  である。また、設置高さが  $h$  であり、車両仰角が  $\theta_M$  であり、設置角度が  $\theta_{LDV1}$  である。 $r_2$ 、 $r_3$  も同様に変数を定義している。

【0036】

設置高さ  $h$  とは、車両仰角  $\theta_M$  が  $0^\circ$  のときにおけるドップラー振動計が設置される高さのことであり、ドップラー振動計 LDV1 ~ 3 の照射口 IP1 ~ 3 を通る線 SL と、たわみが発生していない車両走行面 Vs との間の距離のことを指す。交点 I とは、車両仰角  $\theta_M$  が  $0^\circ$  のときにおけるドップラー振動計 1 ~ 3 の照射口 IP1 ~ 3 を通って x 軸に沿って伸びる線と、回転中心 M を通って z 軸に沿って伸びる線との交点のことである。

30

【0037】

車両仰角  $\theta_M$  とは、図 2 B に示すように、車両走行面 Vs と載荷用車両 10 のなす角度のことであり、ドップラー振動計 LDV1 ~ 3 の照射口 IP1 ~ 3 を通る線 SL と、車両走行面 Vs との間の角度のことを指す。なお、車両仰角  $\theta_M$  は、図 2 B で示される矢印の向きを正とする。車両仰角  $\theta_M$  は、載荷用車両 10 の走行時に変動する。

【0038】

上記の数式 (1) ~ (4) を用いて、ドップラー振動計 LDV1 から取得される測定値  $u_1$  について、以下の数式 (9) で表すことができる。なお、載荷用車両 10 の上下動に由来する変動速度を  $V_z$  とする。また、数式 (9) の通り、測定値  $u_1$  には、車両走行面 Vs のたわみ速度  $dw/dt$  以外の値が含まれている。

40

【数 7】

$$u_1 = \frac{dw}{dt} \cos(\theta_{LDV1} + \theta_M) + \frac{V_z}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} - \frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{L_X \cos \theta_M + L_Z \sin \theta_M}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV1} + \theta_M)(L_Z - h + L_X \sin \theta_M - L_Z \cos \theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV1} + \theta_M)} \right\} + V \sin(\theta_{LDV1} + \theta_M) \dots (9)$$

【0039】

また、たわみ計測装置 100 に設けられたドップラー振動計が 3 つの場合、各ドップラー振動計 LDV1 ~ 3 から取得される測定値  $u_{1-3}$  は以下の数式 (10) の通りである。なお、 $L_{12}$  は、第 1 のドップラー振動計の照射口 IP1 および第 2 のドップラー振動計の照射口 IP2 間の距離であり、 $L_{23}$  は、第 2 のドップラー振動計の照射口 IP2 および第 3 のドップラー振動計の照射口 IP3 間の距離である。すなわち、ドップラー振動

50

計LDV2から取得される測定値 $u_2$ については、上述したように、 $L_x$ を $(L_x + L_{12})$ に置き換え、 $L_{DV1}$ を $L_{DV2}$ に置き換えることによって示すことができる。

ドップラー振動計LDV3から取得される測定値 $u_3$ については、上述したように、 $L_x$ を $(L_x + L_{12} + L_{23})$ に置き換え、 $L_{DV1}$ を $L_{DV3}$ に置き換えることによって示すことができる。

【数8】

$$u_1 = \frac{dw_1}{dt} \cos(\theta_{LDV1} + \theta_M) + \frac{V_z}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} - \frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{L_x \cos\theta_M + L_z \sin\theta_M}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV1} + \theta_M)(L_z - h + L_x \sin\theta_M - L_z \cos\theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV1} + \theta_M)} \right\} + V \sin(\theta_{LDV1} + \theta_M)$$

$$u_2 = \frac{dw_2}{dt} \cos(\theta_{LDV2} + \theta_M) + \frac{V_z}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} - \frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{(L_x + L_{12}) \cos\theta_M + L_z \sin\theta_M}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV2} + \theta_M)(L_z - h + (L_x + L_{12}) \sin\theta_M - L_z \cos\theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV2} + \theta_M)} \right\} + V \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M)$$

$$u_3 = \frac{dw_3}{dt} \cos(\theta_{LDV3} + \theta_M) + \frac{V_z}{\cos(\theta_{LDV3} + \theta_M)} - \frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{(L_x + L_{12} + L_{23}) \cos\theta_M + L_z \sin\theta_M}{\cos(\theta_{LDV3} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV3} + \theta_M)(L_z - h + (L_x + L_{12} + L_{23}) \sin\theta_M - L_z \cos\theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV3} + \theta_M)} \right\} + V \sin(\theta_{LDV3} + \theta_M)$$

… (10)

【0040】

上述した通り、ドップラー振動計LDV1～3から取得される測定値 $u_{1-3}$ には、車両走行面Vsのたわみ速度 $dw/dt$ 以外の値が含まれている。具体的には、車両仰角 $\theta_M$ の変動に由来する変動速度と、車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ と、走行速度 $V$ とが含まれている。車両仰角 $\theta_M$ の変動に由来する変動速度とは、載荷用車両10が車両仰角方向に変動する速度のことである。車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ とは、載荷用車両10が上下方向に変動する速度のことである。走行速度 $V$ とは、載荷用車両10が車両進行方向TDに直進する動きに由来する速度のことである。すなわち、車両仰角 $\theta_M$ の変動に由来する変動速度と、車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ と走行速度 $V$ に由来する速度とは、いずれも載荷用車両10の動きに基づく速度であり、車両走行面Vsのたわみには起因しない。このことから、車両仰角 $\theta_M$ の変動に由来する変動速度と、車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ と、走行速度 $V$ は、測定値 $u_{1-3}$ から除去する必要があるといえる。

20

【0041】

次に、車両仰角 $\theta_M$ の変動に由来する変動速度と、車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ と、走行速度 $V$ とを除去したうえで、最大たわみ量 $a$ を算出する原理について説明する。初めに、各ドップラー振動計LDV1～3から取得された測定値 $u_{1-3}$ の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度 $V_z$ を除去する。以下の数式(11)、(12)は、車両進行方向TDの最前に位置する第1のドップラー振動計LDV1から取得された測定値 $u_1$ から、他のドップラー振動計LDV2、LDV3から取得された測定値 $u_2$ 、 $u_3$ をそれぞれ減算した式を示している。

30

## 【数 9】

$$\begin{aligned}
u_1 - u_2 &= \left\{ \frac{dw_1}{dt} \cos(\theta_{LDV1} + \theta_M) - \frac{dw_2}{dt} \cos(\theta_{LDV2} + \theta_M) \right\} + V_Z \left\{ \frac{1}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} - \frac{1}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} \right\} \\
&\quad - \frac{d\theta_M}{dt} \left\{ \frac{L_X \cos\theta_M + L_Z \sin\theta_M}{\cos(\theta_{LDV1} + \theta_M)} - \frac{(L_X + L_{12}) \cos\theta_M + L_Z \sin\theta_M}{\cos(\theta_{LDV2} + \theta_M)} + \frac{\sin(\theta_{LDV1} + \theta_M)(L_Z - h + L_X \sin\theta_M - L_Z \cos\theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV1} + \theta_M)} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\sin(\theta_{LDV2} + \theta_M)(L_Z - h + (L_X + L_{12}) \sin\theta_M - L_Z \cos\theta_M)}{\cos^2(\theta_{LDV2} + \theta_M)} \right\} \\
&\quad + V \{ \sin(\theta_{LDV1} + \theta_M) - \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \} \\
&\cong \left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right) - \frac{d\theta_M}{dt} [-L_{12} + (-h + L_X \sin\theta_M) \{ \sin(\theta_{LDV1} + \theta_M) - \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \} - L_{12} \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \sin\theta_M] \\
&\quad + V \{ \cos\theta_M (\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2}) + \sin\theta_M (\cos\theta_{LDV1} - \cos\theta_{LDV2}) \} \\
&\cong \left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right) + \frac{d\theta_M}{dt} [L_{12} + (h - L_X \sin\theta_M) \{ \sin(\theta_{LDV1} + \theta_M) - \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \}] + L_{12} \frac{d\theta_M}{dt} \sin(\theta_{LDV2} + \theta_M) \sin\theta_M \\
&\quad + V \cos\theta_M (\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2}) + V \sin\theta_M (\cos\theta_{LDV1} - \cos\theta_{LDV2}) \\
&\cong \left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right) + \frac{d\theta_M}{dt} [L_{12} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})] + V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2}) \quad \dots (11)
\end{aligned}$$

$$u_1 - u_3 \cong \left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_3}{dt} \right) + \frac{d\theta_M}{dt} [L_{12} + L_{23} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3})] + V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3}) \quad \dots (12)$$

## 【0042】

また、 $\cos$  は、角度の変動に応じてあまり値が変動しないことから、 $\cos_M$ 、 $\cos_{LDV1}$  および  $\cos_{LDV2}$  について 1.0 として計算してもよい。さらに、 $\sin_{LDV1} \cdot \sin_M$ 、 $\sin_{LDV2} \cdot \sin_M$  および  $\sin^2_M$  についても、かなり小さい値となり、算出されるたわみ量への影響が小さいことから、0.0 として計算してもよい。

## 【0043】

ここで、車両走行面  $Vs$  のたわみ速度  $dw/dt$  の差について、数式(2)を用いて表すと以下の数式(13)となり、数式(11)を用いて表すと数式(14)となる。ここで  $x_1$ 、 $2$  は図 2A の車輪直下を原点とする局所座標系において、ドップラー振動計 LDV1、2 の  $x$  軸上におけるレーザー照射位置である。

30

## 【数 10】

$$\left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right) = 2abV \{ (x_1 - d)e^{-b(x_1 - d)^2} - (x_2 - d)e^{-b(x_2 - d)^2} \} \quad \dots (13)$$

$$\left( \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right) = u_1 - u_2 - \frac{d\theta_M}{dt} [L_{12} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})] - V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2}) \quad \dots (14)$$

## 【0044】

数式(13)と数式(14)とは等号で繋がられる関係であることから、以下の数式(15)のように変形することで最大たわみ量  $a$  を算出する式となる。

## 【数 11】

$$a = \frac{u_1 - u_2 - \frac{d\theta_M}{dt} [L_{12} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})] - V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})}{2bV \{ (x_1 - d)e^{-b(x_1 - d)^2} - (x_2 - d)e^{-b(x_2 - d)^2} \}} \quad \dots (15)$$

## 【0045】

50

また、第2のドップラー振動計LDV2の測定値 $u_2$ の代わりに第3のドップラー振動計LDV3の測定値 $u_3$ を用いると、以下の式(16)の通りとなる。ここで $x_3$ は図2Aの車輪直下を原点とする局所座標系において、ドップラー振動計LDV3の $x$ 軸上におけるレーザー照射位置である。

【数12】

$$a = \frac{u_1 - u_3 - \frac{d\theta_M}{dt} \{L_{12} + L_{23} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3})\} - V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3})}{2bV \{ (x_1 - d)e^{-b(x_1 - d)^2} - (x_3 - d)e^{-b(x_3 - d)^2} \}} \quad \dots (16)$$

【0046】

数式(15)と数式(16)とを等号で繋げると以下の数式(17)となる。この式から、たわみ形状に関する係数 $b$ を求めることができる。

【数13】

$$\begin{aligned} & \frac{u_1 - u_2 - \frac{d\theta_M}{dt} \{L_{12} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})\} - V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV2})}{2bV \{ (x_1 - d)e^{-b(x_1 - d)^2} - (x_2 - d)e^{-b(x_2 - d)^2} \}} \\ &= \frac{u_1 - u_3 - \frac{d\theta_M}{dt} \{L_{12} + L_{23} + h(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3})\} - V(\sin\theta_{LDV1} - \sin\theta_{LDV3})}{2bV \{ (x_1 - d)e^{-b(x_1 - d)^2} - (x_3 - d)e^{-b(x_3 - d)^2} \}} \quad \dots (17) \end{aligned}$$

【0047】

このとき、最大たわみ発生位置 $d$ については、例えば、図3に示すグラフに基づいて算出された近似式から算出することができる。図3は、走行速度 $V$ と最大たわみ発生位置 $d$ との関係性を示したグラフである(松井邦人ほか, “走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国における取組み”, 土木技術資料55-12, 2013年より抜粋)。この場合の近似式としては、例えば、以下の数式(18)が挙げられる。

【数14】

$$d = 3.08 \times 10^{-6} \cdot V^3 - 2.64 \times 10^{-4} \cdot V^2 + 1.06 \times 10^{-2} \cdot V \quad \dots (18)$$

【0048】

算出されたたわみ形状に関する係数 $b$ と、最大たわみ発生位置 $d$ とを、数式(15)または数式(16)に代入することで、最大たわみ量 $a$ が算出される。

【0049】

なお、上記では、ガウス関数を用いた最大たわみ量 $a$ の算出方法について述べたが、最大たわみ量 $a$ の算出に用いる関数は、たわみ曲線 $w$ の形状に近似した曲線であればよく、例えば、数式(19)で示される関数であってもよい。図4に示すように、数式(19)はガウス関数に近似した曲線を描く関数である。

## 【数 1 5】

$$w = \frac{a}{1 + b(x - d)^2} \quad \dots (19)$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{2ab(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots (20)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{2abV(x - d)}{\{1 + b(x - d)^2\}^2}$$

## 【0050】

なお、ドップラー振動計が2つの場合については、過去の測定実績等から仮定したたわみ形状に関する係数bと、最大たわみ発生位置dとを、数式(15)または数式(16)に代入することで、最大たわみ量aが算出される。

20

## 【0051】

上述した通り、本発明者らは、鋭意研究の結果、ドップラー振動計から取得された測定値のなかには、載荷用車両の動きに由来する速度として、車両の上下動に由来する変動速度と、車両の仰角変動に由来する変動速度と、走行速度とが含まれることをまず発見した。そして、本発明者らは、車両の上下動に由来する変動速度については、複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで除去し、車両の仰角変動に由来する変動速度については、仰角変動計から取得された仰角の変動に基づく角速度を用いて除去し、走行速度に由来する速度については、ドップラー振動計の設置角を用いて除去し、車両の上下動に由来する変動速度、車両の仰角変動に由来する変動速度、および走行速度を除去したたわみ速度に関する物理量から、最大たわみ量を算出する方法を見出し、本発明に至った。

30

## 【0052】

[たわみ計測装置の構成]

図5～11を参照して、本実施形態のたわみ計測装置、たわみ計測システム、たわみ計測方法を具現化した一実施形態について説明する。以下では、最大たわみ量の算出にガウス関数を用いる場合について説明するが、上述の通りガウス関数以外の関数によって算出されてもよい。

## 【0053】

まず、図5～8を参照して、たわみ計測装置について説明する。たわみ計測装置100は、たわみが生じ得る車両走行面Vsのたわみを動的に測定する。車両走行面Vsとは、車両が走行可能であり、健全度を評価する対象として、たわみを測定することが有効である走行面のことを指し、例えば、アスファルトコンクリートまたはセメントコンクリート等で舗装された舗装路面、鉄道のレール、建物の床などが挙げられる。

40

## 【0054】

図5は、センサ架台20および車輪1周辺におけるたわみ計測装置100を模式的に表した部分拡大図である。図5に示すように、たわみ計測装置100は、載荷用車両10の車体2に剛結されるセンサ架台20と、センサ架台20に剛結され、車両仰角 $\theta$ の変動を検出する仰角変動計21と、センサ架台20に剛結され、車両走行面Vsのたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を測定値として検出する複数のドップラー振動計LDV1～3と、を含む。剛結とは、部材同士をぶれなく結合させることを指し、例えば、ボルト

ナットによる締結、はめ込み、溶接、接着等の手法が挙げられる。

【 0 0 5 5 】

載荷用車両 1 0 は、車体 2 にセンサ架台 2 0 を剛結可能であり、車両走行面  $V_s$  に荷重をかける車輪 1 を有していればよく、例えば、中型車両などが挙げられる。このとき、車両走行面  $V_s$  に対して車輪 1 が荷重をかける方向を載荷方向  $L_D$  とする。載荷用車両 1 0 は、必ずしも載荷用車両 1 0 自体が動力源を有している必要はなく、図 6 に示すように、けん引式の装置であってもよい。この場合、他の車両を動力源として、載荷用車両 1 0 を走行させてもよいし、手動で走行させてもよい。

【 0 0 5 6 】

上述した通り、仰角変動計 2 1 と、ドップラー振動計  $L_D V$  とが剛結されたセンサ架台 2 0 は、車体 2 に剛結されている。センサ架台 2 0 の形状は特に限定されないが、仰角変動計 2 1 やドップラー振動計  $L_D V$  等のセンサを剛結して一体化させ、センサとセンサ架台 2 0 とが同じ動きをさせる必要があるため、剛性の高い材料を用いて変形しない構造となるようにする必要がある。例えば、鉄が挙げられる。

10

【 0 0 5 7 】

ドップラー振動計  $L_D V$  1 ~ 3 は、レーザー光によって、下方に位置する車両走行面  $V_s$  のたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を測定する。図 2 A に示すように、車輪 1 の前方に位置するドップラー振動計  $L_D V$  1 は、下方に向いたたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出し、後方に位置するドップラー振動計  $L_D V$  2 および 3 は、上方に向いたたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出することが望ましい。

20

【 0 0 5 8 】

ドップラー振動計  $L_D V$  は複数あればよく、3 つ以上あればなおよく、ドップラー振動計  $L_D V$  の数が多いほど算出される最大たわみ量  $a$  の確度が向上する。一方、ドップラー振動計  $L_D V$  の数が少ないほど最大たわみ量  $a$  の算出に要する計算量を減らすことができる。

【 0 0 5 9 】

ドップラー振動計  $L_D V$  の取付位置と取付数については、図 5 に示すように、車両進行方向  $T_D$  に対して、車輪 1 の前方および後方のそれぞれにおいて、少なくとも 1 つ以上ドップラー振動計  $L_D V$  が設けられていることが望ましい。車輪 1 の前方および後方のそれぞれにおいて、少なくとも 1 つ以上ドップラー振動計  $L_D V$  が設けられていることから、ドップラー振動計  $L_D V$  から取得された測定値  $u$  の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度による影響を除去した後の値が大きくなる。

30

【 0 0 6 0 】

また、ドップラー振動計  $L_D V$  1 ~ 3 は、図 7 に示すように、車輪 1 の後方だけに設けられてもよいし、前方だけに設けられてもよい。要は、載荷用車両 1 0 のいずれかの車輪 1 の車両進行方向  $T_D$  に対する前方または後方において車両走行面  $V_s$  のたわみ速度を含む車両走行面との相対速度を検出できる位置に設けられていればよい。

【 0 0 6 1 】

仰角変動計 2 1 は、例えば、ジャイロセンサ、変位計、傾斜計である。仰角変動計 2 1 は、車両仰角  $\theta_m$  の変動、すなわち、車両仰角方向における載荷用車両 1 0 の仰角  $\theta_m$  の変動を測定できればよい。

40

【 0 0 6 2 】

なお、仰角変動計 2 1 がジャイロセンサまたは傾斜計である場合には、センサ架台 2 0 に 1 つ設けられていればよい。一方、仰角変動計 2 1 が変位計である場合には、たわみ計測装置 1 0 0 の前方および後方に設ける必要がある。

【 0 0 6 3 】

仰角変動計 2 1 が変位計または傾斜計の場合には、以下の数式 ( 2 1 ) から角速度  $G$  を算出する必要がある。このとき、 $\alpha_{12}$  は、架台 2 0 と車両走行面  $V_s$  との角度である。なお、 $\alpha_{12}$  は、図 8 で示される矢印の向きを正とする。

50

## 【数 1 6】

$$G = \frac{d\theta_{d12}}{dt} \quad \dots (21)$$

## 【0064】

数式(21)は、図8から導き出せる以下の数式(22)に基づく。図8は、仰角変動計21が変位計である場合のたわみ計測装置100を示している。図8では、ドップラー振動計LDV、速度計22、歪み計25等について省略している。図8に示すように、車両10の前方に位置する変位計21の底面から車両走行面Vsまでの距離を $h_{d1}$ とし、後方に位置する変位計21の底面から車両走行面Vsまでの距離を $h_{d2}$ とし、変位計21間のx軸方向における距離を $L_{d12}$ とする。

10

## 【数 1 7】

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta_{d12} &= \frac{h_{d1} - h_{d2}}{L_{d12}} \\ \text{よって } \theta_{d12} &= \tan^{-1} \left( \frac{h_{d1} - h_{d2}}{L_{d12}} \right) \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

## 【0065】

なお、図5に示すように、たわみ計測装置100には、速度計22と、2つ以上の歪み計25とがさらに設けられていても良い。速度計22は、載荷用車両10の走行速度Vを測定する。歪み計25は、車両走行面Vsにかかる荷重を計測するために設けられ、車両走行面Vsに荷重をかける車輪1の車軸1aを中心として、上下方向において互いに向き合うように取り付けられる。

20

## 【0066】

[たわみ計測システムの構成]

図9に示すように、たわみ計測システム500は、上述したたわみ計測装置100によって測定された測定データに基づいて、車両走行面Vsの最大たわみ量aを算出する。

## 【0067】

図9に示すように、たわみ計測システム500は、たわみ計測装置100と、たわみ算出装置200と、表示部300とから構成される。たわみ計測装置100は、最大たわみ量aの算出に要するデータを収集し、たわみ算出装置200へ出力する。

30

## 【0068】

たわみ算出装置200は、たわみ計測装置100から出力された測定データから最大たわみ量aを算出する。図9に示すように、たわみ算出装置200は、信号処理部201、記憶部202、演算部203および操作部204を備える。なお、たわみ算出装置200は、1つまたは複数のたわみ計測装置100から測定データが入力されてもよい。

## 【0069】

信号処理部201は、たわみ計測装置100から出力されたアナログ信号をデジタル信号に変換する。

40

## 【0070】

記憶部202は、フラッシュメモリ等から構成され、演算部203の処理に必要なプログラムやデータを記憶している。記憶部202は、信号処理部201にて変換されたデジタル信号の値について、計測日時と対応づけて記憶する。また、演算部の最大たわみ量算出に関するデータを記憶する。

## 【0071】

演算部203は、CPUやRAMを含み、記憶部202に記憶されたプログラムやデータに基づいて、信号処理部201によって変換されたデジタル信号の値から、最大たわみ量aを算出する。

50

## 【 0 0 7 2 】

操作部 2 0 4 は、例えば、キーボード、タッチパネル、マウスなどである。ユーザは、操作部 2 0 4 によって、最大たわみ量  $a$  を算出する際に用いられるパラメータや計算式等を任意に変更可能である。

## 【 0 0 7 3 】

表示部 3 0 0 は、たわみ算出装置 2 0 0 によって算出された最大たわみ量  $a$  を含む情報を表示する。表示部 3 0 0 は、たわみ算出装置 2 0 0 から出力された情報を視覚的に出力可能であればよく、例えば、モニターやタブレット等である。表示部 3 0 0 は、有線もしくは無線通信を介して、たわみ算出装置 2 0 0 から情報を受け取る。

## 【 0 0 7 4 】

## [ 最大たわみ量の計測方法 ]

次に、図 1 0 を参照して、最大たわみ量の計測方法の一例を説明する。図 1 0 は、本発明の最大たわみ量の計測方法を示すフローチャートである。

## 【 0 0 7 5 】

最初に、載荷用車両 1 0 を走行させ、車両走行面  $V_s$  のたわみを動的に測定する（ステップ  $S_1$ ）。このとき、載荷用車両 1 0 の走行速度  $V$  は、一定であってもよいし、不定であってもよい。走行速度が不定である場合には、速度計 2 2 によって、走行速度  $V$  が測定されている必要がある。これにより、供用中の道路における交通の流れを乱すことなく測定が可能となる。

## 【 0 0 7 6 】

このとき、各種測定値の補正係数の設定に要する測定を行なっても良い。具体的には、仰角変動計に関する補正係数  $k_{12}$ 、 $k_{13}$  を算出するための測定を行っていても良い。以下に、仰角変動計 2 1 に関する補正係数の設定方法について詳述する。

## 【 0 0 7 7 】

まず、たわみ計測装置 1 0 0 を搭載した車両を停止させた状態で、走行時の車両仰角  $\theta_m$  の変動を想定して、車両を仰角方向に動かし、車両の仰角  $\theta_m$  のみを変動させ、各ドップラー振動計 1 ~ 3 の測定値  $u_{1-3}$  と、角速度  $G$  とを測定する。仰角変動計 2 1 が変位計または傾斜計の場合には、前述の通り、測定値から角速度  $G$  を算出する。そして、以下の数式（2 3）、（2 4）によって、仰角変動計に関する補正係数  $k_{12}$ 、 $k_{13}$  を算出する。なお、振幅値は、片振幅であっても両振幅であってもよい。

$$k_{12} = u_1 - u_2 \text{ の振幅値} / \text{角速度 } G \text{ の振幅値} \quad \dots (23)$$

$$k_{13} = u_1 - u_3 \text{ の振幅値} / \text{角速度 } G \text{ の振幅値} \quad \dots (24)$$

## 【 0 0 7 8 】

次に、たわみ算出装置 2 0 0 は、たわみ計測装置 1 0 0 から測定データを取得する（ステップ  $S_2$ ）。このとき、アナログ信号については、その値をデジタル信号に変換する。

## 【 0 0 7 9 】

たわみ算出装置 2 0 0 は、各ドップラー振動計の設置角度  $\theta_{LDV1-3}$  を用いて、ドップラー振動計  $LDV1-3$  から取得された測定値  $u_{1-3}$  における設置角度  $\theta_{LDV1-3}$  の影響を補正してもよい。この際に、走行速度  $V$  により重畳された速度成分の除去を同時に行なっても良い。たわみ算出装置 2 0 0 は、以下の数式（2 5）によって測定値  $u_{1-3}$  の補正值  $WV1-3$  を算出する。これにより、走行速度  $V$  を除去することができる。

$$WV1 = u_1 - V \cdot \sin(\theta_{LDV1})$$

$$WV2 = u_2 - V \cdot \sin(\theta_{LDV2})$$

$$WV3 = u_3 - V \cdot \sin(\theta_{LDV3}) \quad \dots (25)$$

## 【 0 0 8 0 】

次に、たわみ算出装置 2 0 0 は、ドップラー振動計  $LDV$  から取得された測定値  $u$  の差をとることによって、測定値  $u$  から車両の上下動に由来する変動速度を除去し、車両の上下動に由来する変動速度が除去された値および仰角変動計から取得された車両仰角の変動に基づく角速度を用いて、車両の仰角変動に由来する変動速度を除去する（ステップ  $S_3$ ）

)。

【 0 0 8 1 】

すなわち、第 1 のドップラー振動計 L D V 1 から取得された測定値  $u_1$  の補正値を W V 1 とし、第 2 のドップラー振動計 L D V 2 から取得された測定値  $u_2$  の補正値を W V 2 とし、第 3 のドップラー振動計 L D V 3 から取得された測定値  $u_3$  の補正値を W V 3 とし、仰角変動計に関する補正係数を  $k_{12}$ 、 $k_{13}$  とし、ジャイロセンサにより測定された角速度を G Y R O とするとき、第 1 のドップラー振動計 L D V 1 の測定値  $u_1$  と第 2 のドップラー振動計 L D V 2 の測定値  $u_2$  の差から車両の仰角変動に由来する変動速度を除去した値である S I G 1 2 が数式 ( 2 6 ) から算出され、第 1 のドップラー振動計 L D V 1 の測定値  $u_1$  と第 3 のドップラー振動計 L D V 3 の測定値  $u_3$  の差から車両の仰角変動に由来する変動速度を除去した値である S I G 1 3 が数式 ( 2 7 ) から算出される。これにより、ドップラー振動計 L D V 1 ~ 3 から取得された測定値  $u_{1-3}$  から、走行速度と車両の上下動に由来する変動速度と車両の仰角変動に由来する変動速度とが除去される。

10

$$S I G 1 2 = W V 1 - W V 2 - k_{12} \cdot G Y R O \quad \dots ( 2 6 )$$

$$S I G 1 3 = W V 1 - W V 3 - k_{13} \cdot G Y R O \quad \dots ( 2 7 )$$

【 0 0 8 2 】

次に、最大たわみ発生位置  $d$  を求める ( ステップ S 4 ) 。前述の通り、最大たわみ発生位置  $d$  は近似式である数式 ( 1 8 ) から算出してよい。

【 0 0 8 3 】

次に、たわみ算出装置 2 0 0 は、以下の数式 ( 2 8 ) を用いて、たわみ形状に関する係数  $b$  を求める ( ステップ S 5 ) 。ここで  $x_1 \sim 3$  は図 2 A の車輪直下を原点とする局所座標系において、ドップラー振動計 L D V 1 ~ 3 の  $x$  軸上におけるレーザー光照射位置である。

20

【 数 1 8 】

$$\frac{SIG12}{2bV\{(x_1-d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_2-d)e^{-b(x_2-d)^2}\}} = \frac{SIG13}{2bV\{(x_1-d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_3-d)e^{-b(x_3-d)^2}\}} \quad \dots (28)$$

【 0 0 8 4 】

次に、たわみ算出装置 2 0 0 は、以下の数式 ( 2 9 ) を用いて、最大たわみ量  $a$  を算出する ( ステップ S 6 ) 。算出された最大たわみ量  $a$  は、計測日時と対応づけられて記憶部 2 0 2 に記録される。

30

【 数 1 9 】

$$a = \frac{SIG12}{2bV\{(x_1-d)e^{-b(x_1-d)^2} - (x_2-d)e^{-b(x_2-d)^2}\}} \quad \dots (29)$$

【 0 0 8 5 】

ドップラー振動計 L D V は複数あればよく、3 つ以上あればなおよく、ドップラー振動計 L D V の数が多いほど算出される最大たわみ量  $a$  の確度が向上する。一方、ドップラー振動計 L D V の数が少ないほど最大たわみ量  $a$  の算出に要する計算量を減らすことができる。

40

【 0 0 8 6 】

なお、ドップラー振動計が 2 つの場合については、たわみ形状に関する係数  $b$  を過去の測定実績などから仮定して数式 ( 2 9 ) を用いて、最大たわみ量  $a$  を算出する。

【 0 0 8 7 】

たわみ算出装置 2 0 0 は、最大たわみ量  $a$  に対して、荷重補正を行なっても良い ( ステップ S 7 ) 。荷重補正とは、車両走行面 V s にかかる荷重を任意の値に補正することである。最大たわみ量  $a$  に補正係数  $k_w$  を乗算することによって、車両走行面 V s にかかる荷重が任意の値であるときの最大たわみ量  $a$  に補正できる。補正係数  $k_w$  は、任意の荷重値を E とし、傾きを  $\theta$  とし、切片を  $\phi$  とし、車軸 1 a 上側に位置する歪み計 2 5 で測定され

たひずみを  $\delta_1$  とし、車軸 1 a 下側に位置する歪み計 2 5 で測定されたたひずみを  $\delta_2$  としたとき、以下の数式 (30) によって算出される。これにより、車両走行面  $V_s$  にかかる荷重を任意の荷重値  $E$  に補正することができ、車両走行面  $V_s$  のたわみを評価しやすくなる。また、車両走行面  $V_s$  にかかる荷重が異なる他のたわみ計測装置 1 0 0 で計測されたデータとの比較が容易となる。

$$k_w = E / ( (1 - \delta_2) + \delta_1 ) \quad \dots (30)$$

#### 【0088】

なお、傾き  $\theta$  と切片  $b$  は、図 1 1 に示す一次関数の傾きと切片である。図 1 1 は  $y$  軸を車輪 1 の荷重とし、 $x$  軸を上下ひずみの差  $\delta_1 - \delta_2$  とした関係式の一例を示すグラフである。傾き  $\theta$  と切片  $b$  は載荷用車両 1 0 に応じて変動するため、載荷用車両 1 0 を変更する場合には、車輪 1 の荷重と、上下ひずみの差  $\delta_1 - \delta_2$  との関係式を新たに求める必要がある。

10

#### 【0089】

車輪 1 の荷重と、上下ひずみの差  $\delta_1 - \delta_2$  との関係式は、車輪 1 の荷重が異なる条件で複数回ひずみを測定して求める。具体的には、平坦な地面の上に車両重量計を設置し、設置した車両重量計の上に車輪 1 が位置するように載荷用車両 1 0 を移動させ、歪み計 2 5 が設置された車輪 1 付近のフレームをジャッキアップ等により車輪 1 に作用する荷重を変化させ、車輪 1 の荷重および車軸 1 a の上側と下側におけるひずみを測定する。ジャッキアップ等により車輪 1 に生じる荷重を変えながら、同様の手順で車輪 1 の荷重および車軸 1 a の上側と下側におけるひずみを複数回測定する。測定結果から回帰直線の傾き  $\theta$  と切片  $b$  を求める。

20

#### 【0090】

たわみ算出装置 2 0 0 は、算出された最大たわみ量  $a$  と計測時間とが対応づいたデータに対して、メディアンフィルタをかけてもよい。このとき、フィルタ長は、評価したい車両走行面  $V_s$  の距離、サンプリングレート、走行速度  $V$  等を考慮して定められる。例えば、走行速度  $V$  が  $20 \text{ km/h}$ 、サンプリングレートが  $2000 \text{ Hz}$  という条件で測定された測定データについて、評価区間長  $5 \text{ m}$  における車両走行面  $V_s$  の最大たわみ量  $a$  を評価したい場合、フィルタ長は  $1500 \sim 2000$  が望ましい。

#### 【0091】

たわみ算出装置 2 0 0 は、最大たわみ量  $a$  に対して温度補正を行なっても良い (ステップ S 8)。温度補正とは、測定対象面がアスファルト混合物層の場合においてはアスファルト混合物層のたわみ量が測定時の温度によって異なるため、測定した最大たわみ量より、標準温度で測定した場合の最大たわみ量  $a$  に補正するものである。温度補正する方法としては、たとえば、「(公社)日本道路協会、「舗装性能評価法」、平成 25 年 4 月」に記載されている、測定時のアスファルト混合物層の温度およびアスファルト混合物層の層厚から補正する方法などがある。

30

#### 【0092】

次に、たわみ算出装置 2 0 0 は、データの出力を行なう (ステップ S 9)。たわみ算出装置 2 0 0 は、算出した最大たわみ量  $a$  を含むデータを表示部 3 0 0 に出力する。表示部 3 0 0 は、たわみ算出装置 2 0 0 から出力されたデータを表示する。

40

#### 【0093】

このように算出された最大たわみ量は、車両の上下動に由来する変動速度と車両の仰角変動に由来する変動速度とを考慮せずに算出された場合と比較して、最大たわみ量  $a$  の算出の確度が向上されており、車両走行面のたわみを正確に把握することを可能にする。

#### 【0094】

(実施例 1)

まず、発明者らは、ドップラー振動計  $LDV$  の設置角度と車両仰角の和 ( $\theta_{LDV} + \theta_M$ ) が変動する範囲と、 $\sin(\theta_{LDV} + \theta_M)$  および  $\cos(\theta_{LDV} + \theta_M)$  に対する影響について検証した。設置角度  $\theta_{LDV}$  が  $2.0^\circ$  程度となるように、ドップラー振動計  $LDV$  を設置した。

50

## 【0095】

図12に示すように、約1400m走行し、その間のドップラー振動計LDVの設置角度と仰角の和( $\theta_{LDV} + \theta_M$ )の変動を変位計によって計測した結果、 $1.3^\circ \sim 2.5^\circ$ の間で変動することが分かった。これを鑑みて、 $\theta$ が $0.0^\circ \sim 3.0^\circ$ の範囲における $\sin \theta$ と $\cos \theta$ の変動についてグラフで示した。図13は、 $\sin \theta$ の変動を示し、図14は、 $\cos \theta$ の変動を示している。図13および図14で示す結果から、 $\sin \theta$ は、 $\theta$ の変動に影響を受けやすいことに対して、 $\cos \theta$ は、 $\theta$ の変動にあまり影響を受けないことが分かった。このことから、 $\cos \theta$ の変動は、最大たわみ量 $a$ の算出にほぼ影響を与えないことから、 $\cos \theta = 1.0$ として計算しても支障はない。

## 【0096】

(実施例2、3)

次に、本発明者らは、仰角変動計21に関する補正係数 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ の要否について検討した。

## 【0097】

実施例2および実施例3における最大たわみ量 $a$ を算出するために、第1のドップラー振動計LDV1、第2のドップラー振動計LDV2を設置した。なお、第1のドップラー振動計の設置角度 $\theta_{LDV1}$ は $2.31^\circ$ であり、第2のドップラー振動計の設置角度 $\theta_{LDV2}$ は $2.09^\circ$ であった。そして、たわみ計測装置100を停止させた状態で、走行時の車両仰角 $\theta_M$ の変動を想定して、車両の仰角方向に車両を動かした。図15、図16に示すように、10秒の間、各ドップラー振動計によって測定値 $u$ を測定し、ジャイロセンサによって角速度 $G$ を測定した。

## 【0098】

実施例2は、第1のドップラー振動計LDV1の測定値 $u_1$ と第2のドップラー振動計LDV2の測定値 $u_2$ との差をとったものを $u_1 - u_2$ とし、ジャイロセンサにより測定された角速度 $G$ に対して補正係数 $k_{12}$ を乗算しない場合である。図15は、このようなドップラー振動計の速度差および補正前の角速度を示したものである。

## 【0099】

実施例3は、第1のドップラー振動計LDV1の測定値 $u_1$ と第2のドップラー振動計LDV2の測定値 $u_2$ との差をとったものを $u_1 - u_2$ とし、ジャイロセンサにより測定された角速度に対して補正係数 $k_{12}$ を乗算したものを角速度 $G$ とした場合である。補正係数 $k_{12}$ を $0.438$ とし、補正係数 $k_{13}$ を $0.703$ とした。図16は、このようなドップラー振動計の速度差および補正後の角速度を示すグラフである。

## 【0100】

上述したように、図15は、実施例2の結果を示し、図16は実施例3の結果を示している。このとき、左側の縦軸は速度(m/s)であり、右側の縦軸は角速度(rad/s)であり、横軸は計測時間(s)である。図15と図16とを比較すると、図15では、位相については一致しているが、値は一致していない。これに対し、図16では、第1のドップラー振動計LDV1の測定値 $u_1$ と第2のドップラー振動計LDV2の測定値 $u_2$ との差と、角速度 $G$ と、が一致していることが分かる。このことから、補正係数 $k_{12}$ が必要であることが分かる。なお、補正係数 $k_{13}$ も同様である。

## 【0101】

(実施例4~7、比較例1)

次に、本発明者らは、FWDによる計測結果と、本発明による計測結果とを比較した。また、補正係数 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ を用いた車両の仰角変動に由来する変動速度の除去の有効性についても合わせて検証した。

## 【0102】

実施例4は、図5のように、3つのドップラー振動計LDV1~3とジャイロセンサ21とをたわみ計測装置100に設置した。このとき、第1のドップラー振動計LDV1の設置角度 $\theta_{LDV1}$ は $2.31^\circ$ であり、第2のドップラー振動計LDV2の設置角度 $\theta_{LDV2}$ は $2.09^\circ$ であり、第3のドップラー振動計LDV3の設置角度 $\theta_{LDV3}$ は

10

20

30

40

50

2.12°であった。また、走行速度 $V$ を20 km/hとして測定を行なった。また、最大たわみ量 $a$ の算出の際には、補正係数 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ を用いた車両の仰角変動に由来する変動速度の除去を行った。補正係数 $k_{12}$ を0.438とし、補正係数 $k_{13}$ を0.703とした。また、サンプリングレートを2000 Hzとし、荷重補正後の荷重を49 kNとし、メディアンフィルタのフィルタ長を1600とした。また、ドップラー振動計1~3による車両走行面の照射位置を、車輪直下を0.000 mとしてそれぞれ-0.207 m、+0.205 m、+0.615 mとした。

#### 【0103】

実施例5は、走行速度を40 km/hとしたことを除いて、実施例4と同様である。

実施例6は、最大たわみ量 $a$ の算出の際に、補正係数 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ を用いた車両の仰角変動に由来する変動速度の除去をしないことを除いて、実施例4と同様である。

10

#### 【0104】

実施例7は、走行速度を40 km/hとし、最大たわみ量 $a$ の算出の際に補正係数 $k_{12}$ 、 $k_{13}$ を用いた車両の仰角変動に由来する変動速度の除去をしないことを除いて、実施例4と同様である。

#### 【0105】

また、比較例1として、FWDにより測定を行なった。比較例1は、車両走行面 $V_s$ にかかる荷重を49 kNとし、5 mおきに測定した。

#### 【0106】

図17~20は、比較例1であるFWDによる計測結果と、各実施例の計測結果とを表したグラフである。図17は、実施例4の結果を示しており、図18は、実施例5の結果を示している。図19は、実施例6の結果を示しており、図20は実施例7の結果を示している。縦軸は算出された最大たわみ量 $a$ を示し、横軸は走行距離を示している。

20

#### 【0107】

実施例4および実施例5は、図17、図18に示すように、FWDによる計測結果とほぼ相違ない結果を示していることが分かる。

#### 【0108】

これに対して、実施例6および実施例7は、図19、図20に示すように、FWDによる計測結果と似た傾向を示しているが、最大たわみ量 $a$ の変動が激しく、車両走行面 $V_s$ のたわみを把握しにくい。

30

#### 【0109】

(実施例4、実施例8~10、比較例1)

次に、本発明者らは、ドップラー振動計を設置する位置と、荷重補正が与える影響について検証した。

#### 【0110】

実施例8は、荷重補正を行なわなかったことを除いて、実施例4と同様である。

実施例9は、図7に示すように、車軸1aの後方に3つのドップラー振動計LDVが設けられていることを除いて、実施例4と同様である。

実施例10は、荷重補正を行なわなかったことを除いて、実施例9と同様である。

#### 【0111】

図21および図22において、比較例1の結果を実線で示している。また、図21では、実施例4の結果を二点鎖線で示しており、実施例8の結果を点線で示しており、図22では、実施例9の結果を二点鎖線で示しており、実施例10の結果を点線で示している。なお、図21、図22の縦軸は最大たわみ量 $a$ であり、横軸は走行距離である。

40

#### 【0112】

図21では、FWDの結果である比較例1を示す実線と、実施例4、8の結果を示す二点鎖線および点線との差が小さいことに対し、図22では、実線とそれ以外の線との差が大きい。このことから、ドップラー振動計を車輪の前方および後方に少なくとも1つ設けるように設置することで車両走行面に由来するたわみ速度の差を大きくすることができ、FWDによる測定結果とほぼ同様の結果を得ることができる。

50

## 【 0 1 1 3 】

また、図 2 1 において、荷重補正を行なった実施例 4 を示す二点鎖線と、荷重補正を行っていない実施例 8 を示す点線とを比較すると、実施例 4 の方が、最大たわみ量  $a$  の変動や大きさが比較例 1 と近い。このことから、荷重補正を行なうことで、算出される最大たわみ量  $a$  の確度を向上させ、車両走行面の最大たわみ量  $a$  を正確に評価することができる。

## 【 0 1 1 4 】

( 実施例 4、比較例 1、2 )

次に、本発明者らは、従来の動的たわみ計測装置による最大たわみ量  $a$  の計測方法（特開 2 0 1 6 - 2 3 5 3 7 号公報）と、本発明の計測方法とを比較した。また、FWD による計測結果とそれぞれの結果を比較することで、最大たわみ量  $a$  の確度を評価した。本発明の計測方法としては、実施例 4 と同様の条件で行なった。FWD による計測は、比較例 1 と同様の条件で行なった。

10

## 【 0 1 1 5 】

比較例 2 は、従来技術（特開 2 0 1 6 - 2 3 5 3 7 号公報）であるウェーブレット解析によって、最大たわみ量  $a$  を算出した点とドップラー振動計 1 ~ 3 による車両走行面の照射位置が実施例 4 と異なる。すなわち、測定については、ドップラー振動計 1 ~ 3 による車両走行面の照射位置が異なる以外は実施例 4 と同様の条件で行った。また、ウェーブレット逆変換時のウェーブレット係数（フィルタレベル）を 1 2 とし、ドップラー振動計 1 ~ 3 の照射位置について、車輪直下を 0 . 0 0 0 m として、それぞれ + 0 . 1 5 5 m、+ 0 . 3 5 7 m、+ 0 . 5 6 0 m とした。

20

## 【 0 1 1 6 】

図 2 3、図 2 4 は、最大たわみ量  $a$  を示すグラフである。縦軸は最大たわみ量  $a$  を示し、横軸は走行距離を示す。図 2 3 は、実施例 4 と比較例 1 とを比較したグラフであり、図 2 4 は、比較例 1 と比較例 2 とを比較したグラフである。図 2 3、図 2 4 において、実施例 4 と比較例 2 の計測結果は、実線で示されており、比較例 1 の計測結果は、点線で示されている。

## 【 0 1 1 7 】

図 2 5、図 2 6 は、比較例 1 との相関関係を示す散布図である。図 2 5 の縦軸は、実施例 4 における最大たわみ量  $a$  を示し、図 2 6 の縦軸は、比較例 2 の最大たわみ量  $a$  を示す。図 2 5 および図 2 6 の横軸は、比較例 1 の最大たわみ量  $a$  を示す。

30

## 【 0 1 1 8 】

また、図 2 5、図 2 6 では、近似直線が点線で示されている。また、近似直線の式と決定係数  $R^2$  が右下に示されている。図 2 5 の通り、実施例 4 における近似直線は、 $y = 1 . 0 6 0 6 x - 0 . 2 5 0 2$  であり、決定係数  $R^2$  は、0 . 7 5 8 2 である。図 2 6 の通り、比較例 2 における近似直線は、 $y = 0 . 7 9 8 1 x + 0 . 0 8 7 1$  であり、決定係数  $R^2$  は、0 . 4 1 0 4 である。

## 【 0 1 1 9 】

実施例 4 は、図 2 3 に示すように、外れ値の数が少なく、比較例 1 と近い値を示している。また、図 2 5 における近似直線の傾きが 1 に近いことが分かる。

40

## 【 0 1 2 0 】

これに対して、比較例 2 は、図 2 4 においてばらつきが多いことや、図 2 6 における近似直線の傾きや決定係数  $R^2$  の値が 1 より遠いことから、FWD の計測結果である比較例 1 との相関が実施例 4 よりも弱いことが分かる。また、図 2 6 から、比較例 2 は、比較例 1 と極端にずれた値が見受けられる。

## 【 0 1 2 1 】

このことから、比較例 2 よりも実施例 4 の方が FWD の計測結果と相関関係が強いことから、従来技術と比較して本発明の計測方法では、車両走行面のたわみを動的に計測しつつ、FWD で計測した場合と近い結果が得られるといえる。また、比較例 2 のウェーブレット解析では、車両の動きに由来する速度をウェーブレット解析によって除去することか

50

ら計算が複雑になりやすいが、実施例 4 ではドップラー振動計の測定値の差をとる等して車両の動きに由来する速度を除去するため、最大たわみ量  $a$  の算出にかかる計算量を減らすことができる。

【 0 1 2 2 】

また、実施例 4 では、ある時刻に測定されたデータが 1 つでもあれば、最大たわみ量  $a$  を算出可能である。これに対して、比較例 2 では、ウェーブレット解析に基づいて車両の動きに由来する速度を除去するため、ある時間幅における連続した測定データが必要である。実施例 4 によれば、ドップラー振動計の測定値の差をとる等して車両の動きに由来する速度を除去するため、ある測定時刻における 1 点の測定データから最大たわみ量  $a$  を算出可能となる。

10

【 0 1 2 3 】

( 実施例 4、実施例 5、実施例 1 1、実施例 1 2 )

次に、発明者らは、走行速度の変動が最大たわみ量  $a$  の計測に及ぼす影響を検討した。

【 0 1 2 4 】

走行速度が一定な実施例として、実施例 4 と実施例 5 と同様の条件でそれぞれ 2 回ずつ計測した。走行速度が不定な実施例として、走行速度を 10 ~ 25 km/h の範囲で変動させた実施例 1 1 と、10 ~ 40 km/h の範囲で変動させた実施例 1 2 とを、それぞれ 2 回ずつ計測した。なお、実施例 1 1、実施例 1 2 は、走行速度を除いて、実施例 4 と同様の条件である。

【 0 1 2 5 】

図 2 7 は、実施例 4 と実施例 5 の最大たわみ量  $a$  の計測結果を示しており、図 2 8 A は、実施例 1 1 と実施例 1 2 の最大たわみ量  $a$  の計測結果を示しており、図 2 8 B は、実施例 1 1 および実施例 1 2 の走行速度の測定結果を示している。

20

【 0 1 2 6 】

図 2 7 と図 2 8 A とを比較すると、最大たわみ量  $a$  はほぼ同じ値を示している。このことから、走行速度の変化の有無は、算出される最大たわみ量  $a$  の値にほぼ影響がないことが分かった。また、図 2 7 または図 2 8 A において、1 回目と 2 回目の計測における差異がほぼないことから、再現性が高い結果が得られることが分かった。また、走行速度が異なる実施例 4 および 5 間と、実施例 1 1 および 1 2 間とにおける計測結果の差異がほぼないことから、どのような走行速度であっても、ほぼ変わらない結果を得られるといえる。

30

また、図 2 8 B に示すように、実施例 1 1 および 1 2 では、走行速度の変動の仕方に多少の差異があるが、算出される最大たわみ量  $a$  の値にほぼ影響がないことが分かった。

【 0 1 2 7 】

つまり、走行速度の大小や変動の有無は、計測結果にほぼ影響を与えないことから、走行速度を変動させたとしても、車両走行面  $V_s$  のたわみを計測可能である。そのため、交通規制をせずとも、たわみの計測を可能であるから、実道におけるたわみの計測が容易となる。

【 0 1 2 8 】

( 実施例 1 3 ~ 1 5、比較例 3 ~ 5 )

次に、異なる場所において検証した。実施例 1 3 ~ 1 5 として、つくば市内の実道の様々な場所において 2 回ずつ計測を行なった。図 2 9 は実施例 1 3 ( 測定箇所 A ) と比較例 3 の結果を示しており、図 3 0 は実施例 1 4 ( 測定箇所 B ) と比較例 4 の結果を示しており、図 3 1 は実施例 1 5 ( 測定箇所 C ) と比較例 5 の結果を示している。なお、比較例 3 ~ 5 は、測定場所が異なる以外は比較例 1 と同様である。

40

【 0 1 2 9 】

実施例 1 3 ~ 1 5 において、それぞれ、比較例 3 ~ 5 と最大たわみ量  $a$  がほぼ同じ値を示していることから、異なる場所であっても、最大たわみ量  $a$  を正確に計測できていることを確認した。

【 0 1 3 0 】

( 実施例 4、実施例 1 6 )

50

次に、本発明者らは、最大たわみ量の算出にガウス関数以外のたわみ曲線  $w$  の形状に近似した関数を用いても、ガウス関数と同様の結果を得られるか検証した。

【 0 1 3 1 】

実施例 16 は、数式 (19) を用いて最大たわみ量  $a$  を算出した点が実施例 4 と異なる。図 32 は、実施例 4 と実施例 16 の最大たわみ量  $a$  の計測結果を示している。図 32 に示すように、関数が異なってもほぼ同様の値を示していることを確認した。

【 0 1 3 2 】

以上説明したように、本実施形態によれば、複数のドップラー振動計から取得された測定値の差をとることで車両の上下動に由来する変動速度を除去することから、ドップラー振動計から取得された測定値から車両の上下動に由来する変動速度のみが除去されることとなり、算出される最大たわみ量の確度を向上させることができる。また、車両の上下動に由来する変動速度だけでなく、車両の仰角変動に由来する変動速度についても除去された値を用いているため、算出される最大たわみ量の確度をさらに向上させることが可能となる。さらに、走行速度に変動があっても、最大たわみ量  $a$  を算出可能であることから、実道での計測が容易となる。

【符号の説明】

【 0 1 3 3 】

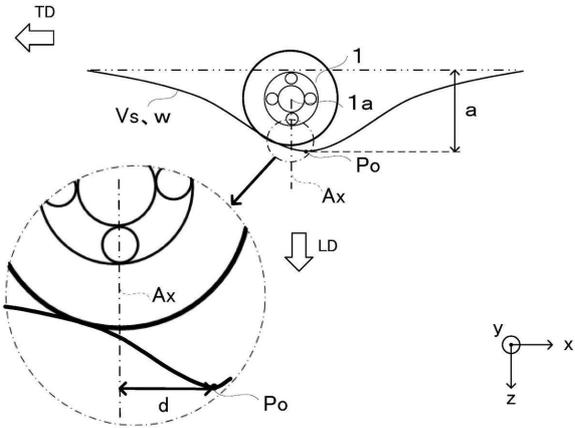
1	車輪	
1 a	車軸	
2	車体	10
1 0	載荷用車両	
2 0	センサ架台	
2 1	仰角変動計	
2 2	速度計	
2 5	歪み計	
1 0 0	たわみ計測装置	
2 0 0	たわみ算出装置	
2 0 1	信号処理部	
2 0 2	記憶部	
2 0 3	演算部	30
2 0 4	操作部	
3 0 0	表示部	
5 0 0	たわみ計測システム	
a	最大たわみ量	
b	たわみ形状に関する係数	
d	最大たわみ発生位置	
h	設置高さ	
r	光路長	
t	計測時間	
u	測定値	40
V	走行速度	
w	たわみ曲線	
x	距離	
$dw / dt$	たわみ速度	
$dr / dt$	光路長 $r$ を時間微分した値	
Ax	車軸の中心を通る鉛直線	
I	交点	
IP	照射口	
LD	載荷方向	
$L_{d1}$	車両 10 の前方に位置する変位計の底面から車両走行面 $Vs$ までの距離	50

- $L_{d2}$  車両10の後方に位置する変位計の底面から車両走行面 $V_s$ までの距離
- $L_{d12}$  変位計12間の $x$ 軸方向における距離
- $LDV$  ドップラー振動計
- $LDV1$  第1のドップラー振動計
- $LDV2$  第2のドップラー振動計
- $LDV3$  第3のドップラー振動計
- $L_o$  各ドップラー振動計間の距離
- $L_x$  ドップラー振動計の照射口 $IP$ から交点 $I$ までの距離
- $L_z$  回転中心 $M$ から交点 $I$ までの距離が $L_z$
- $L_{12}$  第1のドップラー振動計および第2のドップラー振動計間の距離
- $L_{23}$  第2のドップラー振動計および第3のドップラー振動計間の距離
- $M$  仰角中心
- $P_o$  たわみ曲線の頂点
- $SP$  照射口 $IP$ を通る鉛直線
- $SL$  ドップラー振動計 $LDV$ の照射口 $IP$ を通る線
- $TD$  車両進行方向
- $V_s$  車両走行面
- $V_z$  車両の上下動に由来する変動速度
- $\theta_{LDV}$  設置角度
- $M$  車両仰角

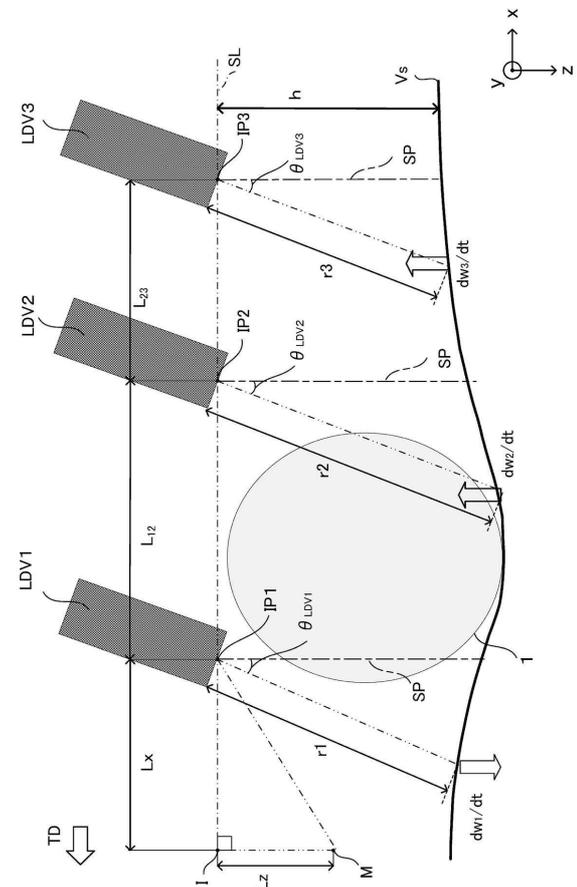
10

20

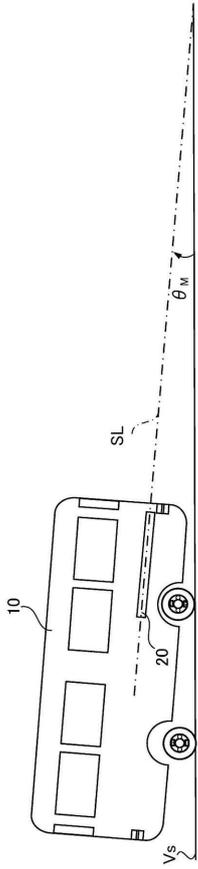
【図1】



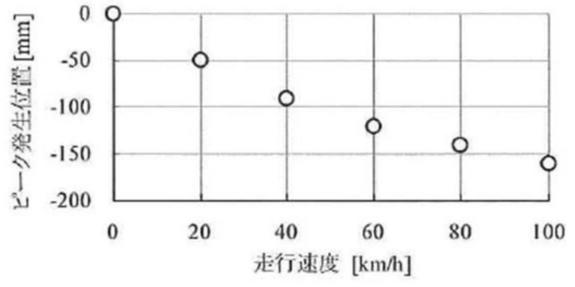
【図2A】



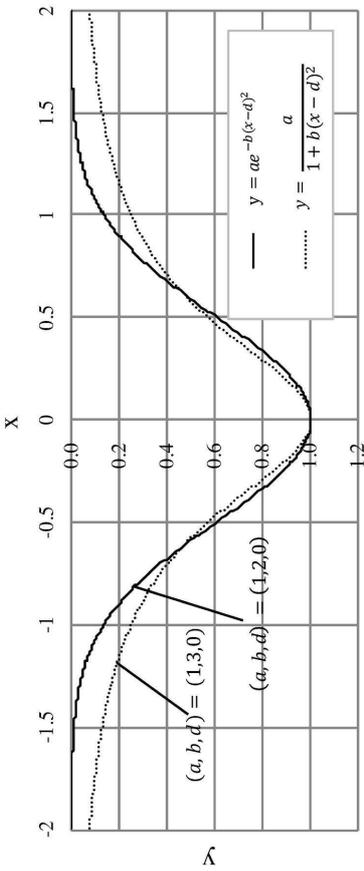
【図 2 B】



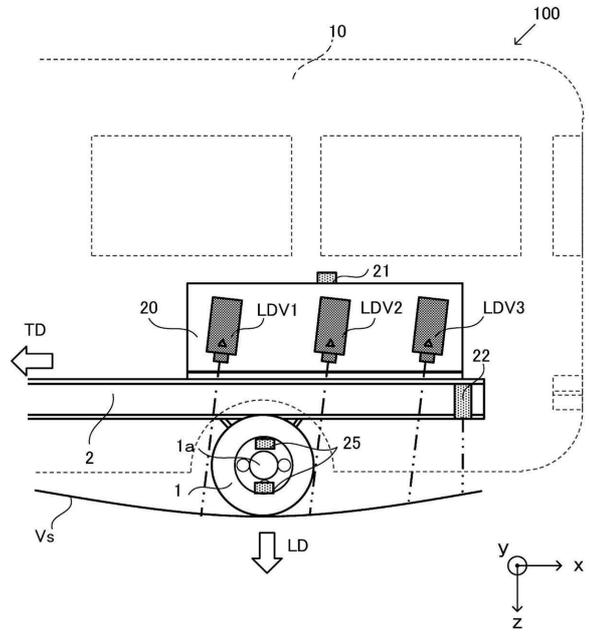
【図 3】



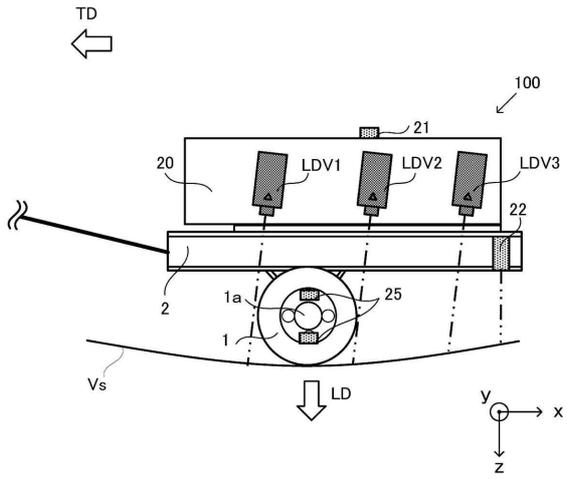
【図 4】



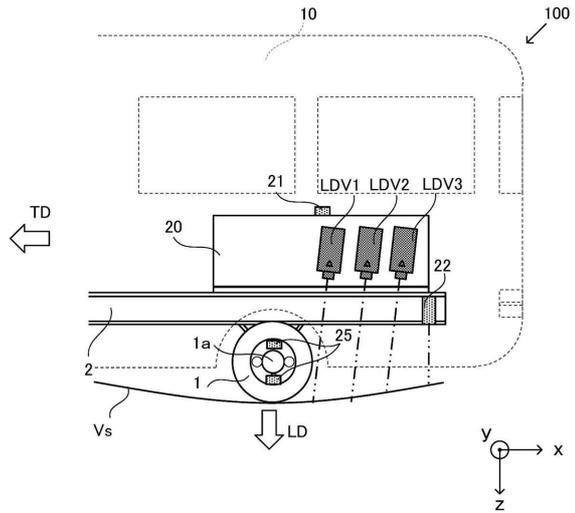
【図 5】



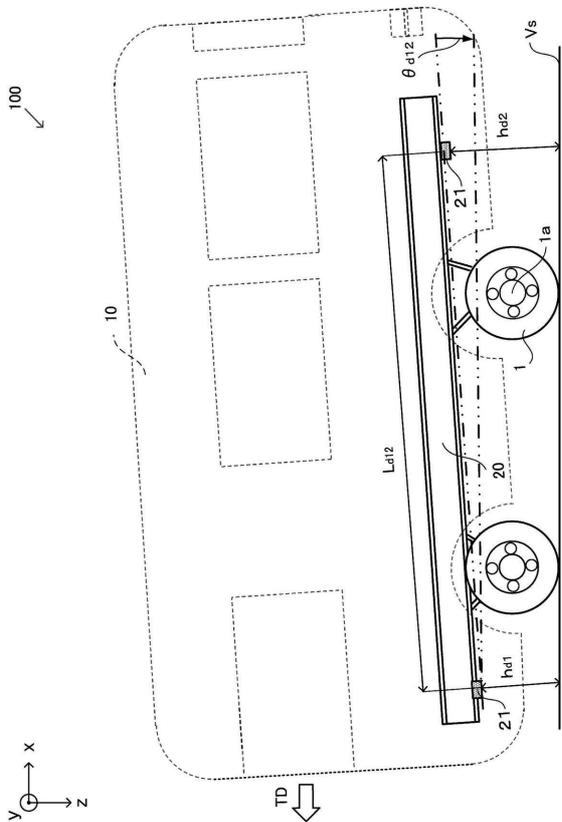
【図6】



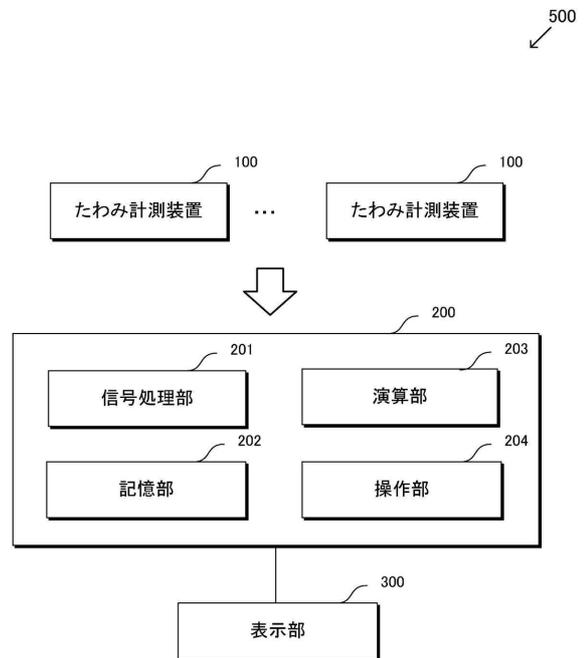
【図7】



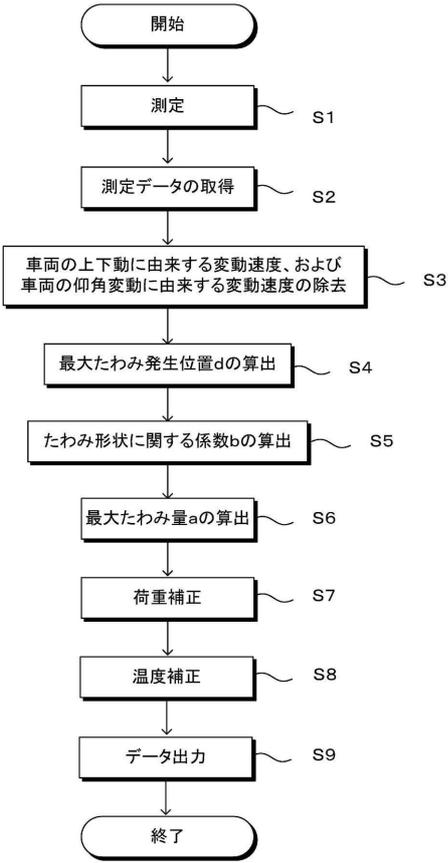
【図8】



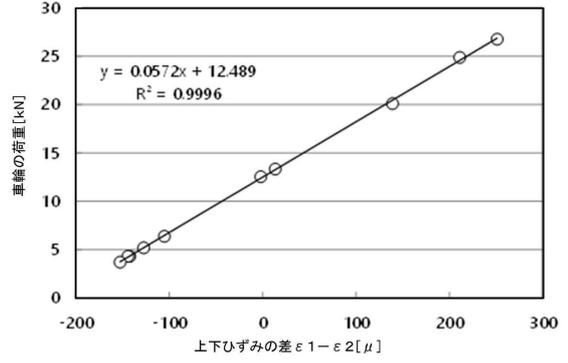
【図9】



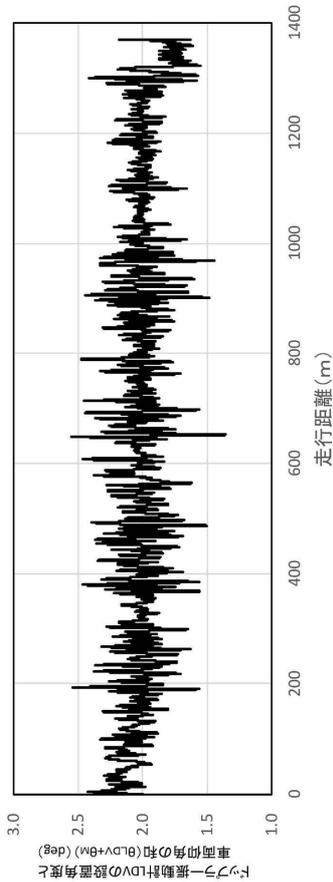
【 図 1 0 】



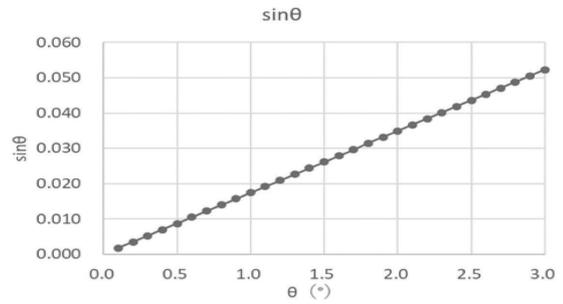
【 図 1 1 】



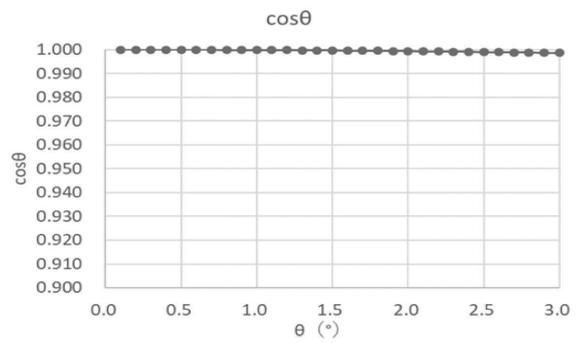
【 図 1 2 】



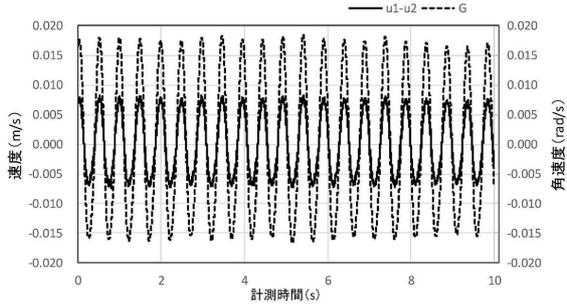
【 図 1 3 】



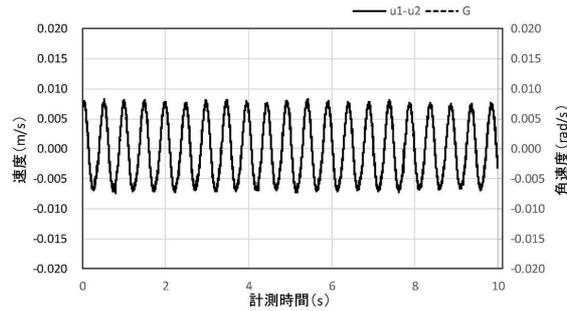
【 図 1 4 】



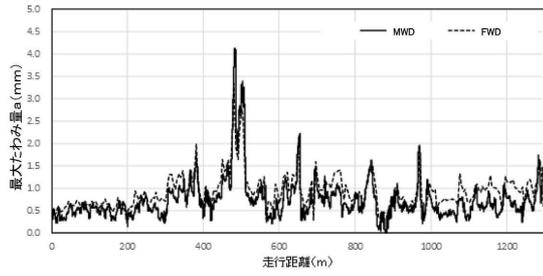
【 図 1 5 】



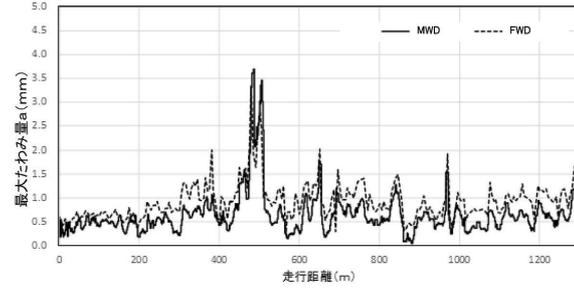
【 図 1 6 】



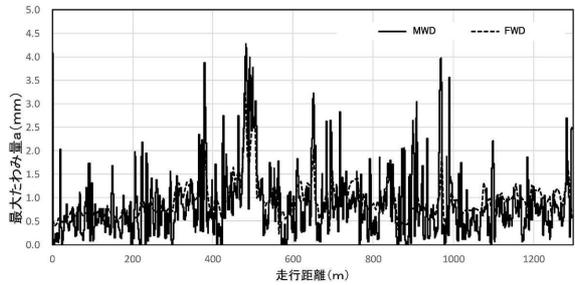
【 図 1 7 】



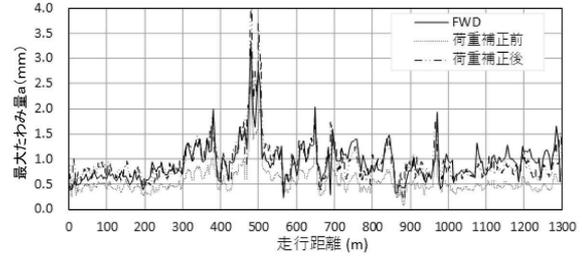
【 図 1 8 】



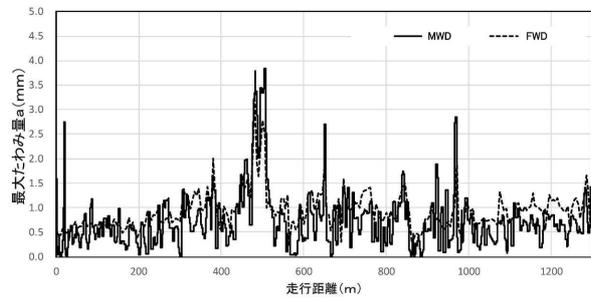
【 図 1 9 】



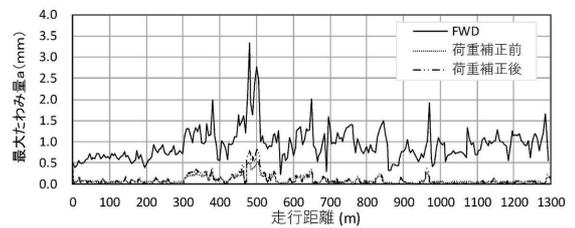
【 図 2 1 】



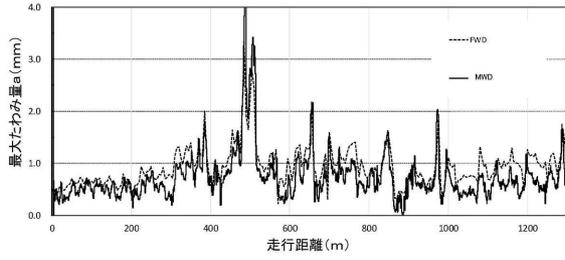
【 図 2 0 】



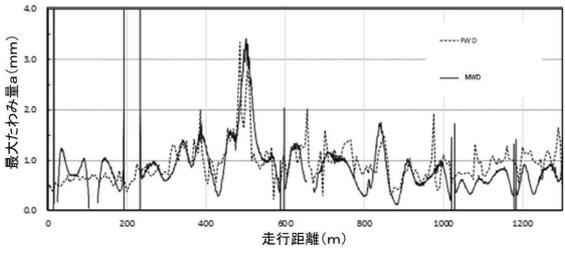
【 図 2 2 】



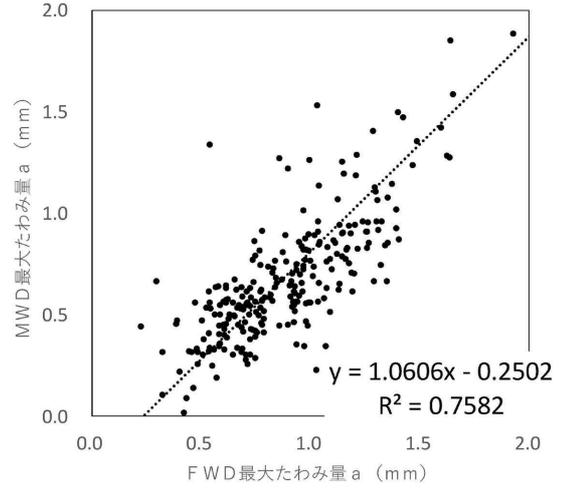
【 図 2 3 】



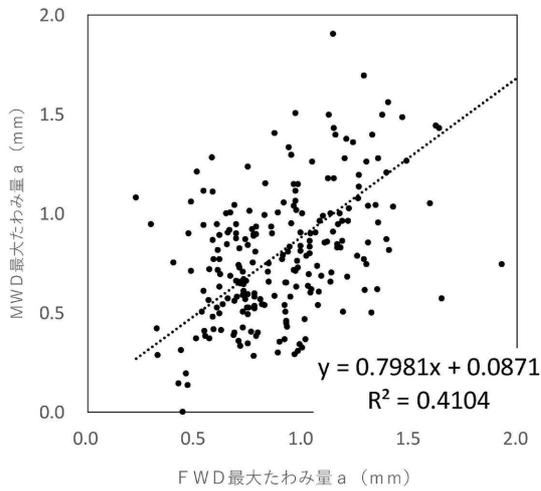
【 図 2 4 】



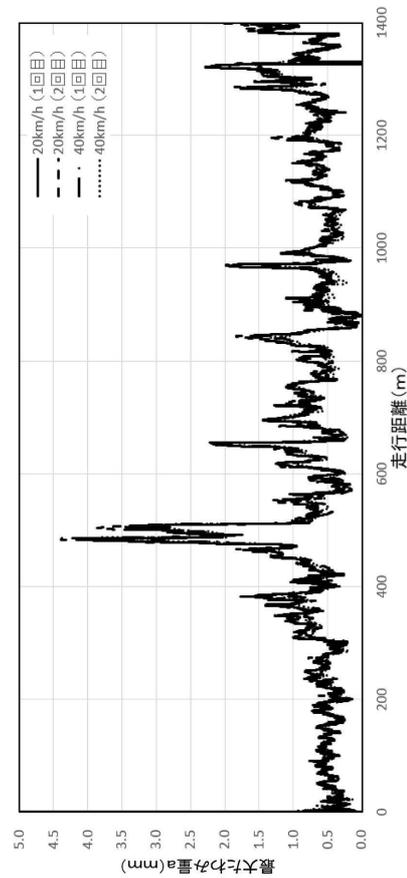
【 図 2 5 】



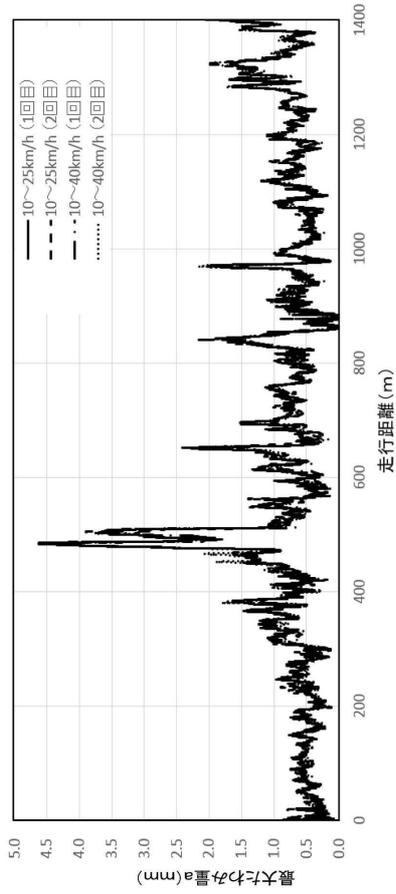
【 図 2 6 】



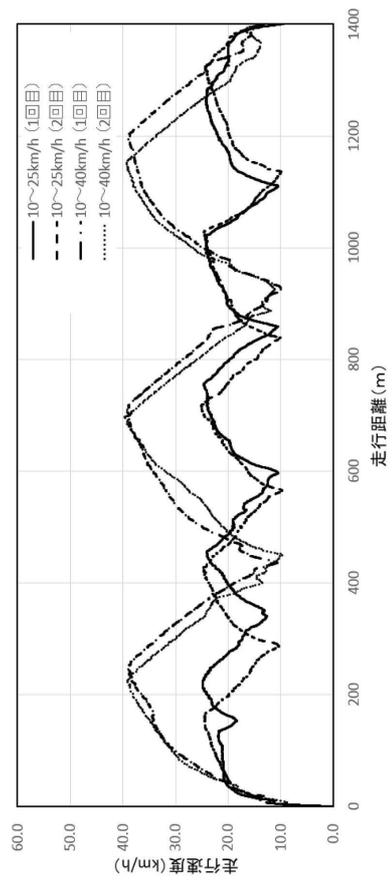
【 図 2 7 】



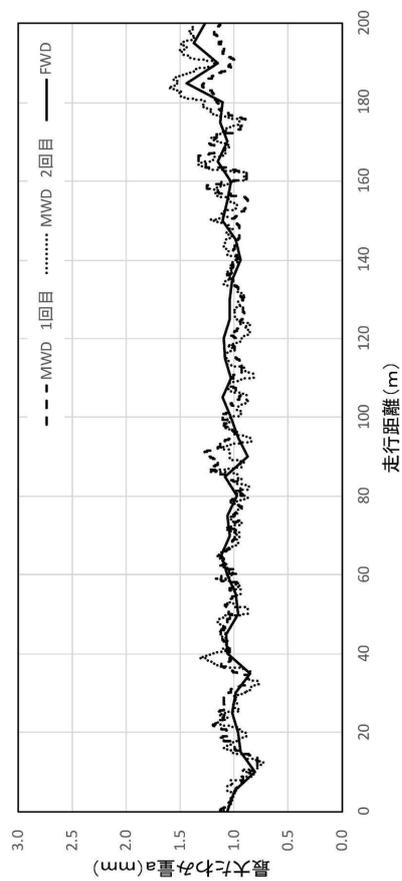
【図 28 A】



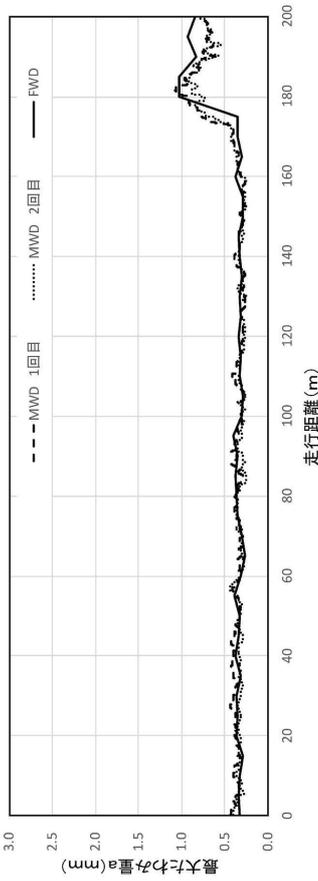
【図 28 B】



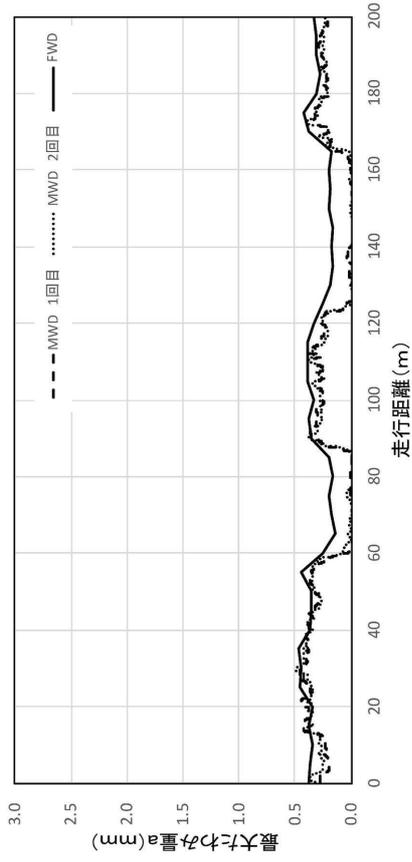
【図 29】



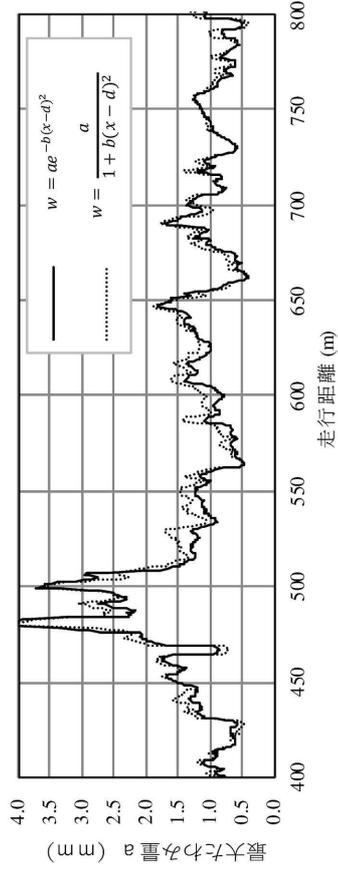
【図 30】



【図 3 1】



【図 3 2】



## フロントページの続き

- (73)特許権者 520236723  
アールテックコンサルタント株式会社  
東京都江東区枝川二丁目13番1号
- (73)特許権者 592179067  
株式会社ガイアート  
東京都新宿区新小川町8番27号
- (73)特許権者 000233653  
ニチレキ株式会社  
東京都千代田区九段北4丁目3番29号
- (74)代理人 100114258  
弁理士 福地 武雄
- (74)代理人 100125391  
弁理士 白川 洋一
- (72)発明者 竹内 康  
東京都町田市能ヶ谷7-45-3
- (72)発明者 川名 太  
神奈川県川崎市多摩区登戸1009 グリームハイツ201号
- (72)発明者 藪 雅行  
茨城県つくば市南原1番地6 国立研究開発法人土木研究所内
- (72)発明者 寺田 剛  
茨城県つくば市南原1番地6 国立研究開発法人土木研究所内
- (72)発明者 綾部 孝之  
茨城県つくば市南原1番地6 国立研究開発法人土木研究所内
- (72)発明者 塚本 真也  
東京都港区六本木七丁目3番7号 東亜道路工業株式会社内
- (72)発明者 梅田 隼  
東京都港区六本木七丁目3番7号 東亜道路工業株式会社内
- (72)発明者 川口 恵之  
静岡県静岡市駿河区中田本町61番1号 協立電機株式会社内
- (72)発明者 山口 和郎  
神奈川県横浜市港北区新吉田町190 電子技研工業株式会社内

審査官 松本 泰典

- (56)参考文献 特開2016-23537(JP, A)  
再公表特許第2018/025341(JP, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
E01C 23/01  
G01C 7/04