

(19) 日本国特許庁 ( J P )

(12) 公開特許公報 ( A )

(11) 特許出願公開番号

特開平11-259145

(43) 公開日 平成11年(1999) 9月24日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

G 0 5 D 13/62

G 0 5 D 13/62

B

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願平10-58318

(22) 出願日 平成10年(1998) 3月10日

(71) 出願人 591159491

運輸省船舶技術研究所長

東京都三鷹市新川 6 丁目 38 番 1 号

(71) 出願人 000005902

三井造船株式会社

東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号

(71) 出願人 598031969

安川エンジニアリング株式会社

福岡県北九州市小倉北区米町 1 丁目 2 番 26 号

(74) 代理人 弁理士 萩野 平 (外 4 名)

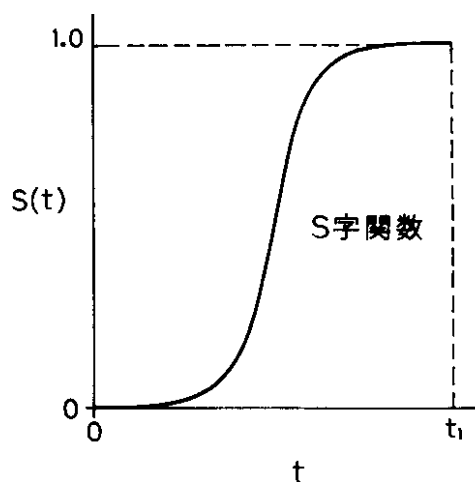
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 時間変数写像法による関数制御系の加減速方法

(57) 【要約】

【課題】 加減速がスムーズに行なわれ、変位、速度、加速度に不連続点無く、加減速時の変位、速度、加速度にオーバーシュート無く、さらに、加減速により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れない関数制御系の加減速方法を提供することを目的とする。

【解決手段】 制御対象の位置および姿勢を規定する  $n$  自由度関数ベクトル  $f(t)$  に対し、実時間変数  $t$  と制御時間変数  $t_c$  との写像関係  $t_c = S(t)$  を与える  $S$  字関数  $s(t)$  に基づく前記制御時間変数  $t_c$  を用いて、制御対象を加減速制御することとし、 $S$  字関数  $s(t)$  を、例えば時刻  $t = 0$  で 0 から漸近的に増加し始め、時刻  $t = t_1$  では一定値 1 をとり、時刻  $t = t_2$  で 1 から漸近的に減少し始め、時刻  $t = t_3$  で 0 に漸近的に飽和する単調増減関数を含む関数とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 任意の  $n$  自由度関数制御系における加減速方法であって、制御対象の位置および姿勢を規定する  $n$  自由度関数ベクトル  $f(t)$  に対し、実時間変数  $t$  と制御時間変数  $t_c$  との写像関係  $t_c = S(t)$  を与える  $S$  字関数  $s(t)$  (ここで、関数  $S(t)$  と関数  $s(t)$  は、 $S(t) = \int_0^t s(t) dt$  の関係を持つものとする) に基づく前記制御時間変数  $t_c$  を用いて、前記制御対象を加減速制御することを特徴とする時間変数写像法による関数制御系の加減速方法。

【請求項 2】 前記  $S$  字関数  $s(t)$  は、時刻  $t = 0$  で 0 から漸近的に増加し、所定時刻  $t = t_1$  で所定値に漸近的に飽和する単調増加関数を含み、該  $S$  字関数  $s(t)$  に基づく制御時間変数  $t_c$  を用いて、前記制御対象を加速制御することを特徴とする請求項 1 に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法。

【請求項 3】 前記  $S$  字関数  $s(t)$  は、時刻  $t = t_2$  に所定値から漸近的に減少し始め、所定時刻  $t = t_3$  で 0 に漸近的に飽和する単調減少関数を含み、該  $S$  字関数  $s(t)$  に基づく制御時間変数  $t_c$  を用いて、前記制御対象を減速制御することを特徴とする請求項 1 に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法。

【請求項 4】 前記  $S$  字関数  $s(t)$  は、時刻  $t = 0$  で 0 から漸近的に増加し始め、第 1 所定時刻  $t = t_1$  では所定値をとり、第 2 所定時刻  $t = t_2$  で前記所定値から漸近的に減少し始め、第 3 所定時刻  $t = t_3$  で 0 に漸近的に飽和する単調増減関数を含み、該  $S$  字関数  $s(t)$  に基づく制御時間変数  $t_c$  を用いて、前記制御対象を加減速制御することを特徴とする請求項 1 に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法。

【請求項 5】 前記制御対象を船舶海洋試験水槽に設置して加減速制御することを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の加減速方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、 $S$  字関数を用いて実時間を制御時間に写像することで、任意の  $n$  自由度関数制御系の加速および減速制御を行なう時間変数写像法による関数制御系の加減速方法に係り、特に、加減速がスムーズに行なわれ、変位、速度、加速度に不連続点が無く、加減速時の変位、速度、加速度にオーバーシュートが無く、さらに、加減速により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れない時間変数写像法による関数制御系の加減速方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】関数制御系は、産業においては各種ロボット、NC 工作機などの比較的軽量級なものから、巨大クレーンなどの重量級なものまで、また試験研究の分野においても自動計測装置などの比較的軽量級なものから試験水槽の XY 台車や造波機などの重量級なものまで、

幅広く自動化、省力化、高精度化を目的として導入されている。これらの関数制御系では、その起動ならびに停止時や、不連続な動作を円滑に接続するような際に、加速ならびに減速制御を要する局面があり、通常は被制御対象により個別に加減速方法を模索しながら制御系の設計が行なわれている。

【0003】よく用いられる加減速方式として、(1) 周期的な運動の制御を行なう系では振幅に  $S$  字関数を乗じてスムーズに増減させることで、緩起動、緩停止を行なう方式、(2) 定速度制御を行なう系では速度に  $S$  字関数を乗じてスムーズに増減させることで、加減速を行なう方式など、変位や速度に  $S$  字関数を乗じる方式がそれぞれ主流であり、加減速時の速度や加速度のオーバーシュートをできるだけ小さくするため、 $S$  字関数として 2 階微分程度までが連続な滑らかな関数を用いることが多い。

【0004】前述の加減速方式は、加減速に十分な助走距離をとらないと速度や加速度のオーバーシュートを生じるものの、個々の関数制御系の加減速方式としては十分である。しかし、種々の運動が組み合わせられた場合や、制御対象の運動がプログラブルで、任意の制御関数に対応する必要がある場合、またある時刻に定められたポイントに制御対象を誘導する必要がある場合などでは不十分である。

【0005】例えば、3次元空間に定められた軌道上を時間スケジュールに遅れることなく移動しながら、軌道に対して相対的な多自由度の周期運動を行なうように、複雑な制御系の加速度制御を行う場合には、前記の加減速方式を各自由度について個別に適用するのでは、各自由度の運動について相互の位相関係にズレを生じ、また各自由度の運動について位相関係を保つためや、時間スケジュールを守るためには、速度や加速度に大きなオーバーシュートを生じることがある。

【0006】このような複雑な関数制御系の加減速方式として、汎用性の高い方法は未だ提案されておらず、従来は、制御対象毎に工夫を要し、これが制御系設計者の腕の見せ所でもあった。しかし、近年では、制御対象の運動がプログラム可能であることとを要求されることが多く、任意の関数制御系に汎用的に適用可能な加減速方法が必要とされている。

## 【0007】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、スムーズな加減速を実現することは、最も基本的な要件である。これには変位、速度はいうまでもなく、加速度についても連続性を保証する加減速方式が必要である。加減速時の変位、速度、加速度に発生しがちなオーバーシュートは制御系の電気系統と機械系統の最大負荷を増加させることになる。この最大負荷の増加は、関数制御系の過負荷の原因になり、安全運転の観点から問題がある。

【0008】また、関数制御系の設計に本来の運転には

不必要な電氣的かつ機械的な容量を強いるため、建設コストと運転コストの増大を招き、経済性の観点からもオーバーシュートを抑制することが重要である。さらに、加減速により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れることは、関数制御の目的を損なうため許されない。

【0009】本発明は、上記従来の問題点および事情に鑑みてなされたものであって、任意のn自由度関数制御系において、次の3つの要件を満たす汎用の加減速方法、すなわち時間変数写像法による関数制御系の加減速方法を実現することが本発明の目的である。

1. 加減速がスムーズに行なわれ、変位、速度、加速度に不連続点が無いこと。
2. 加減速時の変位、速度、加速度にオーバーシュートが無いこと。
3. 加減速により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れないこと。

【0010】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、本発明の請求項1に係る時間変数写像法による関数制御系の加減速方法は、任意のn自由度関数制御系における加減速方法であって、制御対象の位置および姿勢を規定するn自由度関数ベクトル $f(t)$ に対し、実時間変数 $t$ と制御時間変数 $t_c$ との写像関係 $t_c = S(t)$ を与えるS字関数 $s(t)$ (ここで、関数 $S(t)$ と関数 $s(t)$ は、 $S(t) = \int_0^t s(t) dt$ の関係を持つものとする)に基づく前記制御時間変数 $t_c$ を用いて、前記制御対象を加減速制御するものである。

【0011】また、請求項2に係る時間変数写像法による関数制御系の加減速方法は、請求項1に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法において、前記S字関数 $s(t)$ は、時刻 $t = 0$ で0から漸近的に増加し、所定時刻 $t = t_1$ で所定値に漸近的に飽和する単調増加関数を含み、該S字関数 $s(t)$ に基づく制御時間\*

$$s'(t) = ds(t) / dt$$

【0017】

$$S(t) = \int_0^t s(t) dt$$

【0018】尚、本明細書中では、時間に関する一階微分を記号'の付記で表記し、また二階微分を記号''の付記で表記するものとする。例えば、関数 $f(t)$ の一階微分は $f'(t)$ 、二階微分は $f''(t)$ の如くである。

【0019】今、時刻 $t = 0$ で静止状態から制御対象を起動して、時刻 $t = t_1$ で関数ベクトル $f(t)$ で規定

$$t_c = S(t)$$

【0021】この写像により、制御対象の変位 $x$ 、速度 $v$ 、加速度 $a$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$x(t) = f(S(t))$$

【0023】

$$v(t) = f'(S(t))s(t)$$

\* 変数 $t_c$ を用いて、前記制御対象を加速制御するものである。

【0012】また、請求項3に係る時間変数写像法による関数制御系の加減速方法は、請求項1に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法において、前記S字関数 $s(t)$ は、時刻 $t = t_2$ に所定値から漸的に減少し始め、所定時刻 $t = t_3$ で0に漸的に飽和する単調減少関数を含み、該S字関数 $s(t)$ に基づく制御時間変数 $t_c$ を用いて、前記制御対象を減速制御するものである。

【0013】また、請求項4に係る時間変数写像法による関数制御系の加減速方法は、請求項1に記載の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法において、前記S字関数 $s(t)$ は、時刻 $t = 0$ で0から漸的に増加し始め、第1所定時刻 $t = t_1$ では所定値をとり、第2所定時刻 $t = t_2$ で前記所定値から漸的に減少し始め、第3所定時刻 $t = t_3$ で0に漸的に飽和する単調増減関数を含み、該S字関数 $s(t)$ に基づく制御時間変数 $t_c$ を用いて、前記制御対象を加減速制御するものである。

【0014】本発明の関数制御系の加減速方法では、S字関数を変位や速度ではなく、時間に作用させることで、任意のn自由度関数制御系に対する汎用の加減速制御を実現している。この方法を「時間変数写像法」と称する。以下では、制御対象を一般にn自由度の関数ベクトル $f(t)$ で制御するものとし、制御対象の位置および姿勢は該関数ベクトル $f(t)$ で規定されるものとして説明する。

【0015】まず、加速方法について説明する。時刻 $t = 0$ で0から漸的に増加し、時刻 $t = t_1$ で1に漸的に飽和する単調増加関数をS字関数 $s(t)$ (図1参照)と呼び、その微分と積分をそれぞれ次式で表す。

【0016】

【数1】

$$\dots (1)$$

【数2】

$$\dots (2)$$

される運動に収束させたいとする。このような加速方法を実現するため、関数 $S(t)$ を用いて実時間 $t$ と制御時間 $t_c$ との関係を、次式で与えられる写像で与え、実時間変数ではなく制御時間変数 $t_c$ を用いて制御を行なう(図2参照)。

【0020】

【数3】

$$\dots (3)$$

【0022】

【数4】

$$\dots (4)$$

【数5】

$$\dots (5)$$

5

6

【0024】

\* \* 【数6】

$$a(t) = f''(S(t))s^2(t) + f'(S(t))s'(t) \dots (6)$$

【0025】以上の加速過程を、時間を追って説明する。まず、時刻  $t = 0$  では  $S(0) = s(0) = s'(0) = 0$  であるので、次式で与えられる初期位置と初

期姿勢で静止状態にある。

【0026】

$$x(0) = f(0) \dots (7)$$

【0027】

【数8】

$$v(0) = 0 \dots (8)$$

【0028】

10 【数9】

$$a(0) = 0 \dots (9)$$

【0029】次いで、時刻  $0 < t < t_1$  では (4), (5), (6) 式で与えられる加速運動を行なう。最後に、時刻  $t = t_1$  では、図2に示す加速に要する制御時間を  $C$  とすると、 $S(t_1) = t_1 - C$ ,  $s(t_1) =$

$1$ ,  $s'(t_1) = 0$  であるので、次式となり、加速を終了した状態になる。

【0030】

$$x(t_1) = f(t_1 - C) \dots (10)$$

【0031】

\* \* 【数11】

$$v(t_1) = f'(t_1 - C) \dots (11)$$

【0032】

【数12】

$$a(t_1) = f''(t_1 - C) \dots (12)$$

【0033】この段階では制御時間  $t_c$  と実時間  $t$  には加速に要する時間  $C$  だけの差があるのみである。また、時間  $C$  は、関数  $s(t)$  を用いて、次式に示す如く計算

可能である。

【0034】

$$C = t_1 - S(t_1) = t_1 - \int_0^{t_1} s(t) dt \dots (13)$$

尚、加速終了時に関数ベクトル  $f(t)$  で規定された状態に収束させたい場合には、加速開始時刻を  $C$  だけ早めればよい。

を行なう(図4参照)。この写像により、減速時の制御対象の変位  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  は、加速時と同じく (4), (5), (6) 式で与えられる。

【0035】次に、減速方法は加速方法の逆過程として記述できる。時刻  $t = t_2$  に1から漸近的に減少し始め、時刻  $t = t_3$  で0に漸近的に飽和する単調減少関数  $s(t)$  (図3参照) を用い、時刻  $t = t_2$  から運転状態の制御対象を減速させ、時刻  $t = t_3$  で停止させたいとする。ここでも実時間  $t$  と制御時間  $t_c$  との関係 (3) 式の写像で与え、制御時間変数  $t_c$  を用いて制御

【0036】加速過程と同様に、減速過程も時間を追って説明する。まず、時刻  $t = t_2$  では、 $S(t_2) = t_2$ ,  $s(t_2) = 1$ ,  $s'(t_2) = 0$  であるので、次式で示される運転状態にある。

【0037】

$$x(t_2) = f(t_2) \dots (14)$$

【0038】

【数15】

$$v(t_2) = f'(t_2) \dots (15)$$

【0039】

\* \* 【数16】

$$a(t_2) = f''(t_2) \dots (16)$$

【0040】次いで、時刻  $t_2 < t < t_3$  では、(4), (5), (6) 式で与えられる減速運動を行なう。最後に、時刻  $t = t_3$  では、次式で与えられる停止

位置と停止姿勢で静止する。

【0041】

$$x(t_3) = f(t_3 - C) \dots (17)$$

【0042】

【数18】

$$v(t_3) = 0 \dots (18)$$

【0043】

【数19】

$$a(t_3) = 0 \dots (19)$$

【0044】さらに、加減速方法については、時刻  $t = 0$  で0から漸近的に増加し始め、時刻  $t = t_1$  では一定値1をとり、時刻  $t = t_2$  で1から漸近的に減少し始

め、時刻  $t = t_3$  で0に漸近的に飽和する単調増減関数 (図5参照) を、さらに一般的なS字関数  $s(t)$  として用いることで、加減速をセットにした制御が可能であ

る。

【0045】この場合にも、実時間  $t$  と制御時間  $t_c$  との関係は(3)式の写像で与えられる(図6参照)。この写像により、制御対象の変位  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  は、(4)、(5)、(6)式で与えられる。さらに、加減速の組合せで、より一般的なS字関数が定義可能であり、これを用いたより複雑な加減速も以上に説明した方法の組合せで実現することができる。そこで、本明細書では、以下、特に断らない限り、これらの一般的なS字関数を総称して、単にS字関数と記述する。

【0046】本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法では、被制御対象の運動を(4)、(5)、(6)式で与えられる。従って、S字関数  $s(t)$  が  $C^2$  級(2階微分可能)であれば、変位、速度、加速度がすべて連続でかつ滑らかな関数である。また少なくとも  $C^1$  級(1階微分可能)であれば、変位、速度、が連続でかつ滑らかな関数であり、加速度は連続である。そこで、 $C^1$  級以上のS字関数を用いることで、変位、速度、加速度に不連続点のないスムーズな加減速を行なうことができる。実際のデジタル制御においては、微小時間間隔で離散的な制御が行なわれるため、S字関数も離散的であり、厳密に  $C^1$  級の条件を満たす必要はない。

【0047】また、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法では、(4)式で変位を制御するので、加減速中の被制御対象の変位は制御関数ベクトル  $f$  から外れることなく、与えられた軌道上を与えられた姿勢で運動する。よって、加減速中の変位にオーバーシュートはない。次に、速度は(5)式で制御され、加減速中の速度は制御関数ベクトル  $f$  に  $s(t)$  が乗じられた\*

$$s(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{1 + \exp(-a \frac{t}{t_1} + b)} & 0 \leq t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{1}{1 + \exp(+a \frac{t-t_2}{t_3-t_2} - b)} & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t \geq t_3 \end{cases} \quad \dots(20)$$

【0053】ここで、 $0 < t_1 < t_2 < t_3$  であり、 $a$ 、 $b$  はS字関数の立ち上がりの強さを調節するためのパラメータであり、本実施形態では  $a = 10.0$ 、 $b = 5.0$  としている。このようなS字関数  $s(t)$  は、各区間の繋ぎ目において、微小な不連続性があるが、時間的に離散化されたデジタル制御においては誤差範囲であ

\*ものとなっている。ここでS字関数の定義より、 $0 \leq s(t) \leq 1$  であるので、 $|f'(s(t))| \leq |f'|$  となり、速度にもオーバーシュートはない。また、加速度についても、概ね同様の結果となる。

【0048】さらに、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法では、(4)、(5)、(6)式に示すように、全ての運動成分について同一のS字関数を用いた、統一した加減速制御を行なう。そこで、全ての運動成分は加減速中もシンクロナスに制御され、相互の位相関係がくずれることはない。

【0049】

【発明の実施の形態】以下、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法の実施の形態について、図面を参照して詳細に説明する。ここでは、本発明を船舶海洋試験水槽に設置されたX-Y-Zの3自由度運動を行なう走行台車の加減速制御に適用した例を実施形態として以下に示す。

【0050】この走行台車は、その下部に船舶や海洋構造物の模型を取り付けて、水槽中を曳航する目的で建造されたもので、各自由度の運動が関数制御可能であり、その組合せで多様な運転モードが実装されている。これらの運転モードに対し、本発明は不変的に適用可能な加減速方法を提供する。走行台車の座標系を図7に示す。同図において、O-XYZは空間に固定された座標系、o-xyzは走行台車に固定された座標系であり、Uは走行台車の移動速度である。

【0051】(S字関数の例)まず、走行台車の加減速制御に用いたS字関数の具体例を示す。

【0052】

【数20】

$$\begin{cases} t < 0 \\ 0 \leq t < t_1 \\ t_1 \leq t < t_2 \\ t_2 \leq t < t_3 \\ t \geq t_3 \end{cases}$$

…(20)

り、実用上の問題はない。

【0054】このS字関数  $s(t)$  の微分ならびに積分関数は、次式の如くなる。

【0055】

【数21】

$$s'(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{a \exp(-a \frac{t}{t_1} + b)}{\left\{1 + \exp(-a \frac{t}{t_1} + b)\right\}^2} t_1 & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{-a \exp(a \frac{t-t_2}{t_3-t_2} - b)}{\left\{1 + \exp(a \frac{t-t_2}{t_3-t_2} - b)\right\}^2} (t_3 - t_2) & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t \geq t_3 \end{cases} \dots(21)$$

【0056】

\* \* 【数22】

$$S(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t + \frac{t_1}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(-a \frac{t}{t_1} + b)}{1 + \exp(b)} \right| & 0 \leq t < t_1 \\ t + \frac{t_1}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(-a + b)}{1 + \exp(b)} \right| & t_1 \leq t < t_2 \\ t + \frac{t_1}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(-a + b)}{1 + \exp(b)} \right| - \frac{t_3 - t_2}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(a \frac{t-t_2}{t_3-t_2} + b)}{1 + \exp(-b)} \right| & t_2 \leq t < t_3 \\ 2t_3 - t_2 + \frac{t_1}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(-a + b)}{1 + \exp(b)} \right| - \frac{t_3 - t_2}{a} \ln \left| \frac{1 + \exp(b)}{1 + \exp(-b)} \right| & t \geq t_3 \end{cases} \dots(22)$$

【0057】また、図6に示すように、このS字関数  $s(t)$  は、加速部、定常運転部および減速部を備えており、これを用いた時間変数写像法では台車の発進、加速、関数制御運転、減速および停止の過程を連続的に制御することができる。

【0058】(PMMYawモード)まず、PMMYawモードでは、走行台車下部に固定された模型船が進行方向

に対して一定速度  $U$ 、一定針路  $\theta$ 、一定偏角  $\delta$  を保ちながら、振幅  $a$ 、角周波数  $\omega$  で正弦状のYaw運動を行なうように、走行台車を次式で示される関数によって制御する。

【0059】

【数23】

$$\begin{aligned} U(t) &= U \\ \theta(t) &= \theta_0 \\ \delta(t) &= \delta_0 + a \sin(\omega t + \phi) \\ S(t) &= S(t) - \dots(23) \end{aligned}$$

【0060】ここで、走行台車の位置を  $X, Y$  成分で書くと  $(X_0, Y_0)$  を初期位置として、次式となる。

【0061】

【数24】

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0 + U \int_0^t \cos(\omega \tau) d\tau \\ Y(t) &= Y_0 + U \int_0^t \sin(\omega \tau) d\tau \dots(24) \end{aligned}$$

【0062】また、時間変数写像法を用いて、この運動に対する加速度を含む制御関数を求めると、次式が得られる。

【0063】

【数25】

$$a(t) = \# + a \sin(S(t) + \phi)$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}(t) - \dot{\theta}^2(t) \\
& \dot{\theta}(t) = \dot{\theta}_0 \cos(\theta(t) + \theta_0) \\
& v_x(t) = U \cos(\theta(t)) s(t) \\
& v_y(t) = U \sin(\theta(t)) s(t) \\
& v(t) = \dot{\theta}(t) \cos(\theta(t) + \theta_0) s(t) \\
& a_x(t) = U \cos(\theta(t)) s'(t) - U \sin(\theta(t)) \dot{\theta}^2(t) \\
& a_y(t) = U \sin(\theta(t)) s'(t) + U \cos(\theta(t)) \dot{\theta}^2(t) \\
& \ddot{x}(t) = \ddot{x}_0 + \dot{v}_x(t) \\
& \ddot{y}(t) = \ddot{y}_0 + \dot{v}_y(t) \dots (25)
\end{aligned}$$

X(t)とY(t)を与える式に現れる積分を解析的に  
行なうことは一般に困難であるので、本実施形態では数  
値的に行なう。

【0064】これらの制御関数を図8に示す。これは、  
t<sub>1</sub> = 5.0 [s], t<sub>2</sub> = 25.0 [s], t<sub>3</sub> = 3  
0.0 [s], X<sub>0</sub> = 0.0 [m], Y<sub>0</sub> = 0.0  
[m], U = 1.0 [m/s], θ<sub>0</sub> = 0.0 [rad],  
# = π/4 [rad], θ<sub>a</sub> = π/4 [rad], ω = 0.  
2 [rad/s], φ<sub>0</sub> = 0.0 [rad]とした時の制御関数  
であり、加減速時の様子がよく分かる。また、これらの  
制御関数を用いた時の走行台車のX, Y平面上での軌道\*

\*を図9に示す。図中の点(黒丸印)は一定時間毎の走行  
台車の位置であり、与えられた軌道上をトレースしなが  
ら加減速している様子がよく分かる。

【0065】(PMMSway モード)次に、PMMSway  
モードでは、走行台車下部に固定された模型船が進行  
方向に対して一定速度U、一定回転角速度 ωを保ちな  
がら、振幅y<sub>a</sub>、角周波数 ωで正弦状のSway運動を行  
なうように、走行台車を次式で示される関数によって制  
御する。

【0066】  
【数26】

$$\begin{aligned}
& U(t) = U \\
& \phi(t) = \phi_0 + \omega t \\
& y(t) = y_a \sin(\omega t + \varepsilon) \\
& \beta(t) = \begin{cases} -\sin^{-1}(y'(t)/U) & U > 0 \\ \pi - \sin^{-1}(y'(t)/U) & U < 0 \end{cases} \\
& \text{where } |\sin^{-1}| \leq \pi/2 \\
& \alpha(t) = \phi(t) - \beta(t) \dots (26)
\end{aligned}$$

【0067】ここで、走行台車の位置をX, Y成分で書  
くと、(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>)を初期位置として、次式の如くな  
る。

【0068】  
【数27】

$$\begin{aligned}
& X(t) = X_0 + |U| \int_0^t \cos(\alpha(t)) dt \\
& Y(t) = Y_0 + |U| \int_0^t \sin(\alpha(t)) dt \\
& \theta(t) = \theta_0 + \omega t \dots (27)
\end{aligned}$$

【0069】また、時間変数写像法を用いて、この運動  
に対する加速度を含む制御関数を求めると、次式が得ら  
れる。

【0070】  
【数28】

$$\begin{aligned}
& \ddot{x}(t) = \ddot{x}_0 + \dot{v}_x(t) \\
& \ddot{y}(t) = \ddot{y}_0 + \dot{v}_y(t) \\
& \ddot{\theta}(t) = -\sin^{-1}(y'(t)/U) \quad U > 0 \\
& \ddot{\theta}(t) = -\sin^{-1}(y'(t)/U) \quad U < 0 \\
& \ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}(t) - \dot{\theta}^2(t) \\
& \ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}_0 + \omega^2 \\
& \quad + \{ \omega^2 y_a \sin(\theta(t) + \theta_0) / U \} / \\
& \quad \{ 1 - (y_a \cos(\theta(t) + \theta_0) / U)^2 \}^{1/2} \\
& v_x(t) = |U| \cos(\theta(t)) s(t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_y(t) &= |U| \sin(\theta(t)) s'(t) \\
v(t) &= \dot{\theta}(t) s(t) \\
a_x(t) &= |U| \cos(\theta(t)) s''(t) \\
&\quad - |\dot{\theta}(t)| \sin(\theta(t)) s'(t) \\
a_y(t) &= |U| \sin(\theta(t)) s''(t) \\
&\quad + |\dot{\theta}(t)| \cos(\theta(t)) s'(t) \\
a(t) &= \dot{\theta}(t) s'(t) \\
X(t) &= X_0 + \int_0^t v_x(t) dt \\
Y(t) &= Y_0 + \int_0^t v_y(t) dt \quad \dots (28)
\end{aligned}$$

【0071】これらの制御関数を図10に示す。これは、 $t_1 = 5.0 [s]$ 、 $t_2 = 25.0 [s]$ 、 $t_3 = 30.0 [s]$ 、 $X_0 = 0.0 [m]$ 、 $Y_0 = 0.0 [m]$ 、 $U = 1.0 [m/s]$ 、 $\theta_0 = \pi/4 [rad]$ 、 $\dot{\theta}_0 = \pi/60 [rad/s]$ 、 $y_a = 0.5 [m]$ 、 $\theta_a = 0.2 [rad/s]$ 、 $\theta_f = 0.0 [rad]$ とした時の制御関数である。これらの制御関数を用いた時の走行台車のX、Y平面上での軌道を図11に示す。これらの図から、この実施形態においても、加減速時の様子がよく分かる。

【0072】以上説明したように、本実施形態の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法では、目的として掲げた3項目、すなわち

1. 加減速がスムーズに行なわれ、変位、速度、加速度に不連続点が無いこと。
2. 加減速時の変位、速度、加速度にオーバーシュートが無いこと。
3. 加減速により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れないこと。が原理的に全て解決されている。つまり、図8から図11までに示したように、変位、速度はいうまでもなく、加速度についても連続性を保った非常にスムーズな加減速が実現されており、加減速時の変位、速度、加速度にオーバーシュートは全く見られない。また、加速度により各自由度の運動について相互の位相関係が崩れることもない。

【0073】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法によれば、制御対象の位置および姿勢を規定するn自由度関数ベクトル  $f(t)$  に対し、実時間変数  $t$  と制御時間変数  $t_c$  との写像関係  $t_c = S(t)$  を与えるS字関数  $s(t)$  (ここで、関数  $S(t)$  と関数  $s(t)$  は、 $S(t) = \int_0^t s(t) dt$  の関係を持つものとする) に基づく前記制御時間変数  $t_c$  を用いて、制御対象を加減速制御することとし、S字関数  $s(t)$  を、例えば時刻  $t = 0$  で0から漸近的に増加し始め、第1所定時刻  $t = t_1$  では所定値をとり、第2所定時刻  $t = t_2$  で前記所定値から漸近的に減少し始め、第3所定時刻  $t = t_3$  で0に漸近的に飽和する単調増減関数を含む関数として、該S字関数  $s(t)$  に基づく制御時間変数  $t_c$  を用いて、制御対象を加減速制御することとしたので、S字関数  $s(t)$  がC

10 2級(2階微分可能)であれば、変位、速度、加速度がすべて連続でかつ滑らかな関数となり、また少なくともC<sup>1</sup>級(1階微分可能)であれば、変位、速度、が連続でかつ滑らかな関数であり、加速度は連続であることから、C<sup>1</sup>級以上のS字関数を用いることで、変位、速度、加速度に不連続点のないスムーズな加減速を行い得る関数制御系の加減速方法を提供することができる。

【0074】また、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法によれば、 $x(t) = f(S(t))$  で変位を制御するので、加減速中の被制御対象の変位は制御関数ベクトル  $f$  から外れることなく、与えられた軌道上を与えられた姿勢で運動することとなって、加減速中の変位にオーバーシュートは無く、また、速度についても同様に、加減速中の速度は制御関数ベクトル  $f$  にS字関数  $s(t)$  が乗じられたものとなっており、S字関数の定義より、 $0 \leq s(t) \leq 1$  であるので、 $|f'(S(t))| = |f'|$  となり、速度にもオーバーシュートは無く、さらに、加速度についても、概ね同様で、結果として滑らかな加減速を行い得る関数制御系の加減速方法を提供することができる。

30 【0075】さらに、本発明の時間変数写像法による関数制御系の加減速方法によれば、全ての運動成分について同一のS字関数を用い、統一した加減速制御を行なうので、全ての運動成分について加減速中もシンクロナスに制御され、相互の位相関係が崩れることのない関数制御系の加減速方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の加速制御に用いるS字関数  $s(t)$  を例示する説明図である。

【図2】本発明の加速制御時における時間変数の写像関係を示す説明図である。

40 【図3】本発明の減速制御に用いるS字関数  $s(t)$  を例示する説明図である。

【図4】本発明の減速制御時における時間変数の写像関係を示す説明図である。

【図5】本発明の加速と減速を一組にしたS字関数  $s(t)$  を例示する説明図である。

【図6】本発明の加減速制御時における時間変数の写像関係を示す説明図である。

50 【図7】船舶海洋試験水槽に設置されたX-Y-Zの3自由度運動を行なう走行台車の加減速制御における走行



台車の座標系を示す説明図である。

【図8】PMM - Yawモードの加減速制御における制御関数群を例示する説明図である。

【図9】PMM - Yawモードの加減速制御による走行台車の軌跡を示す説明図である。

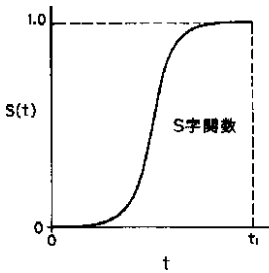
【図10】PMM - Swayモードの加減速制御における制御関数群を例示する説明図である。

【図11】PMM - Swayモードの加減速制御による走行台車の軌跡を示す説明図である。

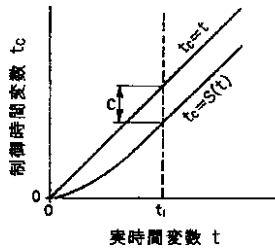
【符号の説明】

- t 実時間変数
- t<sub>c</sub> 制御時間変数
- s(t) S字関数
- S(t) S字関数の積分
- s'(t) S字関数の微分

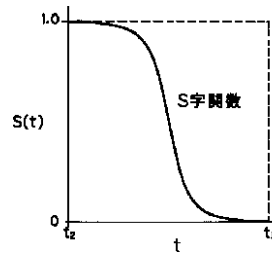
【図1】



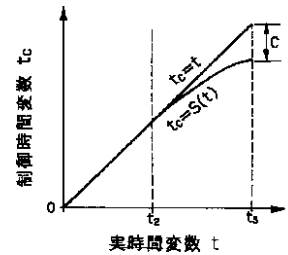
【図2】



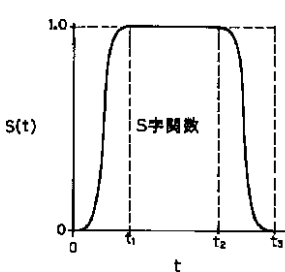
【図3】



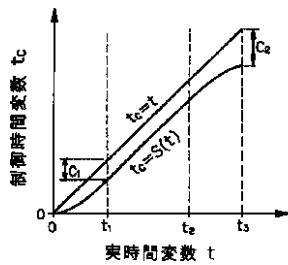
【図4】



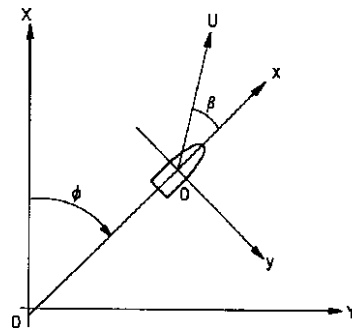
【図5】



【図6】

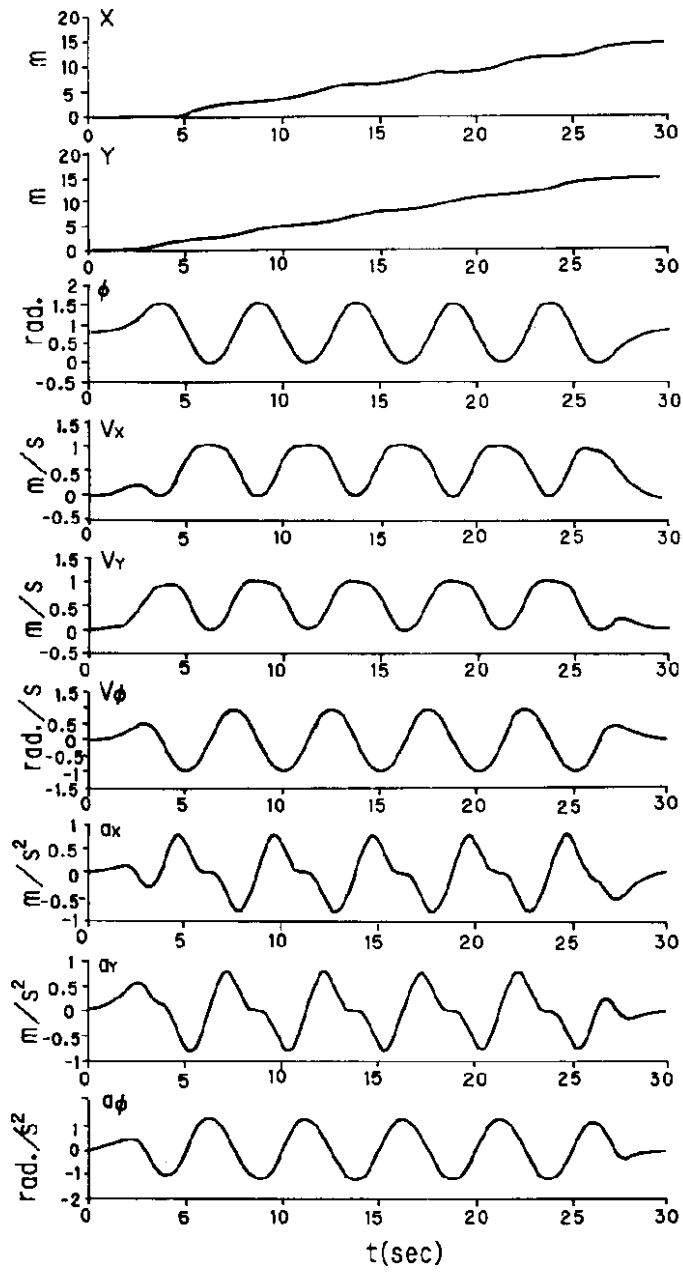


【図7】

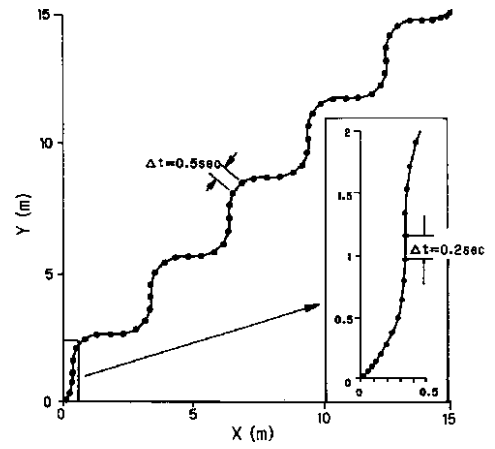


- \* X 空間固定X座標
- Y 空間固定Y座標
- O 空間固定座標の原点
- x 台車固定x座標
- y 台車固定y座標
- o 台車固定座標の原点(回転軸に一致)
- 台車に取り付けられた模型船の船首方位角
- 台車に取り付けられた模型船の横なれ角
- U 台車の水平面内強度
- 10 v<sub>x</sub> 台車速度のX方向成分
- v<sub>y</sub> 台車速度のY方向成分
- v 台車の回転角速度
- a<sub>x</sub> 台車加速度のX方向成分
- a<sub>y</sub> 台車加速度のY方向成分
- \* a 台車の回転角加速度

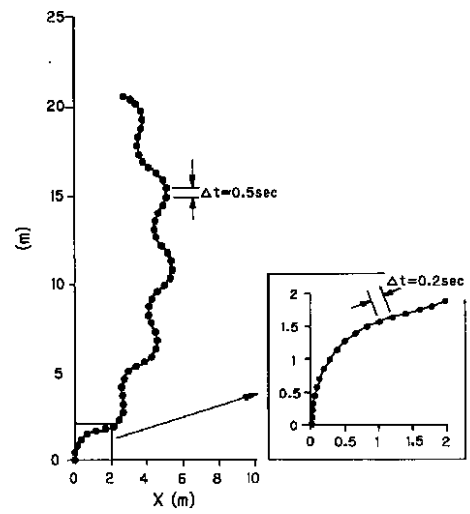
【図8】



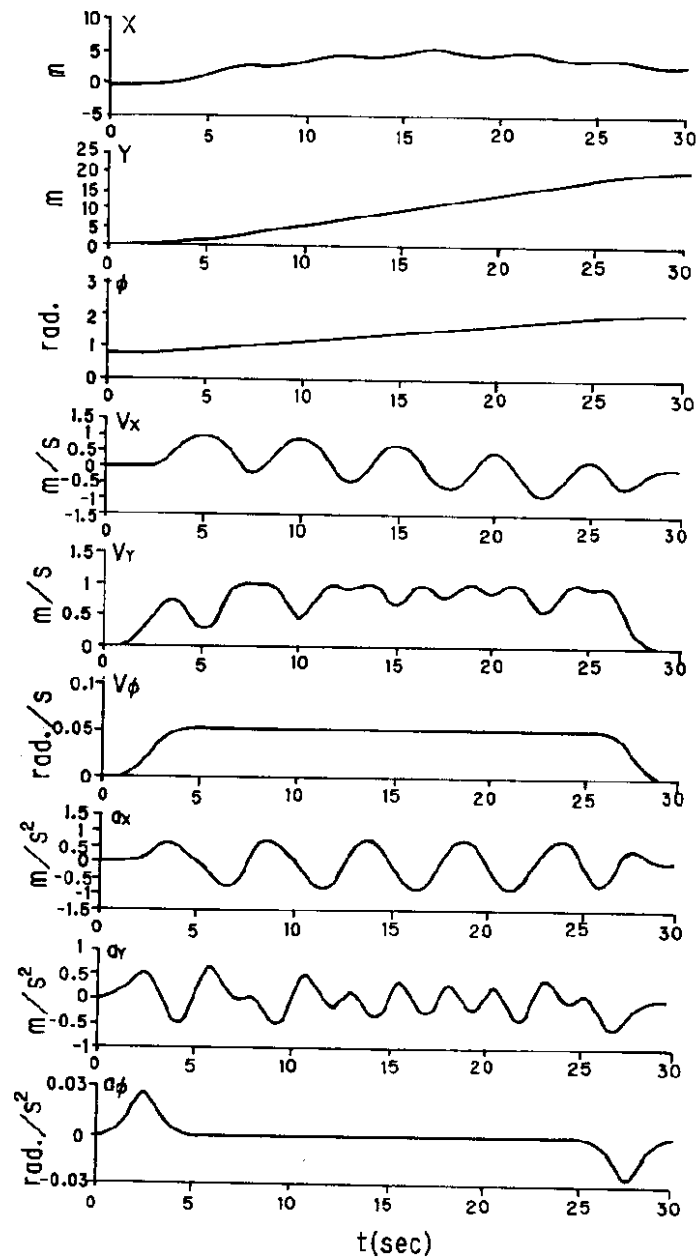
【図9】



【図11】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 谷澤 克治  
東京都三鷹市新川 6 丁目 38 番 1 号 運輸省  
船舶技術研究所内

(72)発明者 上野 道雄  
東京都三鷹市新川 6 丁目 38 番 1 号 運輸省  
船舶技術研究所内

(72)発明者 二村 正  
東京都三鷹市新川 6 丁目 38 番 1 号 運輸省  
船舶技術研究所内

(72)発明者 太田 普晶  
東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号 三井造  
船株式会社内

(72)発明者 合戸 直之  
福岡県北九州市小倉北区米町 1 丁目 2 番 26  
号 安川エンジニアリング株式会社内

(72)発明者 中村 剛  
福岡県北九州市小倉北区米町 1 丁目 2 番 26  
号 安川エンジニアリング株式会社内