

電動6軸パラレルリンクマニピュレータとその応用*

三 村 宣 治^{*1}

A New Analytical System for Evaluating Motion Sensation

Nobuharu MIMURA

A 6-degrees-of-freedom (DOF) motion system using a new parallel link mechanism is developed for the purpose of evaluating human motion sensation. This motion system is made up of three five-bar link mechanisms, each of which has 2-DOF and is driven by AC servo motors. Therefore, this system is very small, but its working area is larger and its response is better than those of the hydraulic Stewart platform. Furthermore, I have developed a high speed parallel signal processing controller for motion control and a new 6-DOF acceleration sensing system based on the parallel sensing concept. Combining the new motion and sensory system with a multi video system, we have constructed a new analytical system for evaluating a wide bandwidth of motion sensation in riding such vehicles such as automobile or airplanes.

Key Words: Parallel Mechanism, Parallel Link Manipulator, Human Motion Sensation, Riding Quality, 6 DOF Acceleration

1. 緒 言

車両の多様化・高性能化に伴い乗り心地・走行フィーリング（操縦感・安定感・制動感など）という人間の動揺・振動感覚に関する計測・評価が重要となってきた⁽¹⁾。特に、初心者・高齢者など、広範囲の被験者に対する評価が今後ますます重要になると考えられている⁽²⁾。

従来、このような計測・評価は、実車を用いた特定のプロテストドライバによって特定のテストコース上で実施されている。しかし、このような方法には、1)危険を伴う、2)試験条件の設定、再現性および人間特性に関する計測などが困難、3)被験者・走行環境を任意に選択できないという問題点がある。たとえば、プロテストドライバはステアリング・ブレーキ・アクセル操作に対し高応答な車両を好む傾向があるのに対して、初心者・高齢者はそのような車両ではぎくしゃくした運転状態になりやすく、プロテストドライバの評価が必ずしも適切とはいえない場合がある。このように、人間-自動車系の研究においては、種々の一般の被験者に対し種々の環境を提示する必要がある。

一方、実車を用いないベンチ試験法として、ドラムテストと呼ばれる装置や1~3自由度程度の加振機を用いる方法がある^{(3)・(4)}。しかし、これらの方法は自由度および可動量が制限されているためリアリティが乏しく試験範囲が制限されるという問題がある。

また、従来、よりリアリティの高い装置としてステュアートプラットフォームと呼ばれる油圧シリンダを用いた装置（Fig. 1）が航空機の訓練用に開発されている⁽⁵⁾。しかし、この方式は駆動源として油圧を用いるため、1)装置寸法に比べ可動範囲が小さく応答性が低い（1~2 Hz）⁽⁶⁾、2)取扱いが煩雑、3)高価などの問題点が指摘されている。一般に、油圧サーボは電動に比べ、高応答であると考えられている。しかし、この装置ではその構造上比較的大きなストローク（約1000~2000mm）のシリンダが必要となり、シリンダ内部作動油の、質量およびシール部の摩擦が無視できない。そして、その圧縮性のため、短ストロークの油圧装置に比べ応答性が著しく劣化する結果となっている。それに対して、自動車の運動特性および自動車シートの振動伝達特性を考慮すれば、人間-自動車系の評価には約5~10 Hz程度までの応答特性を有する多自由

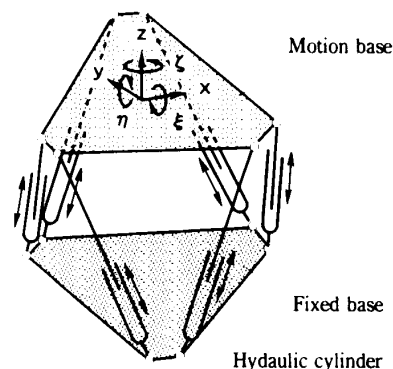


Fig. 1 Stewart platform

* 原稿受付 1995年9月20日。

*¹ 正員、新潟大学工学部 (〒950 21 新潟市五十嵐2-8050)。

度の振動・動揺発生装置が必要であると考えられる⁽²⁾。一方、応答性を重視したパラレルリンクマニピュレータに関する報告がある^{(7)・(8)}。しかし、それらは負荷の軽量化（ペイロード 100kg以下）により高応答化を実現しており、高負荷用途には適さない。

そこで、よりリアリティの高いベンチ試験法の確立を目的として、従来とは異なるパラレルリンク構造の6軸電動動揺・振動付加装置とその制御システムを試作した。本論文では、試作装置の概要とその特長について報告する。

2. 6軸電動動揺・振動付加機構

2.1 機構 小型で高負荷・広可動範囲を実現するため、3組の5角形リンクを組み合わせたパラレルリンク機構（Fig. 2, 3）を開発した。各5角形リンク機構は、5つのリンクを閉ループ状にそれぞれを回転関節で結合した構造である。この5つの関節のうち1つのリンク（以下、ベースリンクと呼ぶ）の両端の関節を駆動関節とし、他を受動関節としている。したがって、ベースリンクに対する頂点 A_i を5角形リンクの出力点とし、また5角形リンクが含まれる平面を P_i とすると、出力点 A_i は、平面 P_i 内において2自由度の運動が可能である。なお、2つの駆動関節は、サイクロイド型減速機（減速比:1/101）を介して工業ロボット用のACサーボモータで駆動している。

3組の5角形リンク機構の出力点 A_i ($i=1, 2, 3$) を3自由度の受動関節を介して振動ベースに取り付けてい

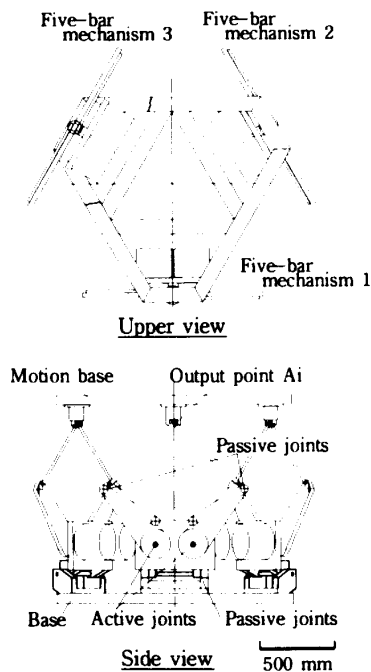


Fig. 2 Overview of developed mechanism

る。また、各5角形リンク機構のベースリンクはFig. 2に示すように1自由度の受動関節を介して下部の固定ベースに取り付けている。以上のような3組の5角形リンク（全6能動関節）により、振動ベースの独立な6自由度運動を実現している。

2.2 幾何学解析

Fig. 4に示すように振動ベースおよび固定ベースの中央に固定した座標系をそれぞれ Σ_m , Σ_b とする。特に、 Σ_m に関しては、あらかじめ定められた中立位置・姿勢（原点）における Σ_m を Σ_{m0} で表すこととする。6つの駆動関節角を動かすことによって得られる振動ベースの原点からの変位を $\mathbf{x}_m = [x \ y \ z \ \xi \ \eta \ \zeta]^T$ 、そのときの関節角を $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$ とする。ここで、変位の回転成分 $[\xi \ \eta \ \zeta]^T$ は Σ_{m0} を基準としてその座標軸 x_{m0}, y_{m0}, z_{m0} のそれぞれの回りにこの順番で回転させた角度（ロール、ピッチ、ヨー角）とする。振動ベースが原点位置にあるときの各5角形リンクの出力点 A_i 位置を ${}^m r_{0i}$ ($i=1, 2, 3$) とする。振動ベースが原点位置より x_m だけ移動した後の出力点 A_i の位置を ${}^b r_i$ とすると（ただし以下、ベクトルの左肩でそのベクトルの属する座標系を表すものとする）、

$${}^b r_i = \mathbf{X} {}^m r_{0i} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{X} は同次変換行列で、

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{x}_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta & 0 & 0 \\ \sin \zeta & \cos \zeta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

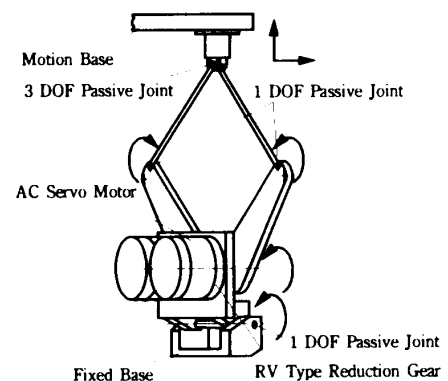


Fig. 3 Five-bar mechanism

である。式(1)、(2)に示すように、各5角形リンク機構の出力点 A_i の位置 ${}^b r_i$ と x_m との関係は線形ではないが x_m を与えることにより、 ${}^b r_i$ ($i = 1, 2, 3$)を一意に決定できる。駆動関節の角度 θ_j は5角形リンク機構の幾何学的性質より ${}^b r_i$ から以下のように計算できる。

まず、 ${}^b r_i$ をそれが属する5角形リンク機構のベースリンクに固定した座標系 Σ_{p_i} で表すと、

$${}^{p_i} r_i = {}^{p_i} T_b \cdot {}^b r_i, \quad {}^{p_i} r_i = [{}^{p_i} r_{ix} \quad {}^{p_i} r_{iy} \quad {}^{p_i} r_{iz} \quad 1]^T \quad (3)$$

である。ここで、 ${}^{p_i} T_b$ は、座標系 Σ_b と Σ_{p_i} との間の同次座標変換行列であり、

$${}^{p_i} T_b = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha_i & -\cos \alpha_i & r_m \sin \alpha_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & -r_m \cos \alpha_i \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

である。また、 r_m および α_i は座標系 Σ_{p_i} の原点の位置を表す (Fig. 4 参照)。駆動関節の関節角は幾何学的に計算でき、

$$\theta_j = \text{atan2}(z_w, l_w) - l_w - \pi/2, \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

ここで、

$$l_w = \begin{cases} \text{atan2}(c_w, l_w) & \text{for } \begin{cases} j = 1, 3, 5 \\ j = 2, 4, 6 \end{cases} \\ -\text{atan2}(c_w, l_w) & \end{cases}$$

$$c_w = \frac{x_w |l_1|^2 - l_w^2}{x_w |l_1|^2 - l_w^2},$$

$$l_w = x_w + |l_2|^2,$$

$$x_w = y_w^2 + z_w^2,$$

$$z_w = \frac{{}^{p_i} r_{ix}^2 + {}^{p_i} r_{iz}^2 - {}^{p_i} o_{iz}}{2},$$

$$y_w = \begin{cases} {}^{p_i} r_{iy} + {}^{p_i} o_{iy} & \text{for } \begin{cases} j = 1, 3, 5 \\ j = 2, 4, 6 \end{cases} \\ {}^{p_i} r_{iy} - {}^{p_i} o_{iy} & \end{cases}$$

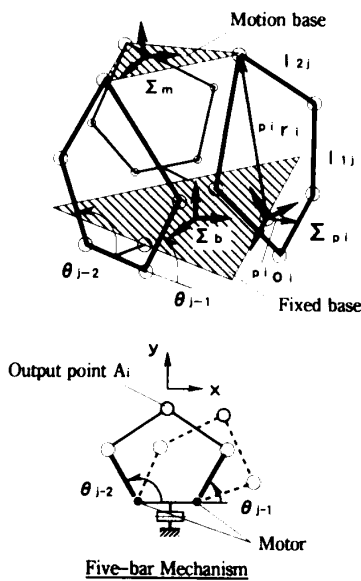


Fig. 4 Coordinate system

$$i = \text{int}((l+j)/2). \quad (6)$$

$${}^{p_i} o_i = [{}^{p_i} o_{ix} \quad {}^{p_i} o_{iy} \quad {}^{p_i} o_{iz}]^T \quad (7)$$

である。式(1)~(5)が振動ベースの位置変位からそれに対応する関節変位を計算する逆運動学方程式である。

一方、関節変位から振動ベースの変位を計算する、いわゆる順運動学方程式は、式(1)~(5)の方程式を逆に解くことになるが、式(1)~(5)は非線形連立方程式であるため一般的な解析解は存在せず、Newton-Raphson 法などの数値解法によらざるを得ない。しかし、実際に振動ベースを制御する際には、振動ベースの変位 x_m が目標値として与えられるので、逆運動学の実時間計算が主に必要であり、実時間での順運動学計算は特に必要ではない。

つぎに、速度に関する関係式は、式(1)~(5)を時間に関して微分することにより得られる。まず、式(1)と(3)より、

$${}^{p_i} r_i = {}^{p_i} T_b X^m r_{oi}, \quad i=1, 2, 3 \quad (8)$$

である。式(8)の両辺を時間で微分すると、

$${}^{p_i} \dot{r}_i = \frac{\partial ({}^{p_i} T_b X^m r_{oi})}{\partial X^m} \dot{X}^m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

である。式(9)を*i*に関しひとまとめに表すと、

$${}^{p_i} \dot{r} = J_x \dot{X}^m \quad (10)$$

ここで、

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x1} \\ J_{x2} \\ J_{x3} \end{bmatrix}$$

$$J_{xi} = \frac{\partial ({}^{p_i} T_b X^m r_{oi})}{\partial X^m}, \quad i = 1, 2, 3,$$

$${}^{p_i} r = [{}^{p_i} r_1^T \quad {}^{p_i} r_2^T \quad {}^{p_i} r_3^T]^T$$

である。また、式(5)より、 θ は ${}^{p_i} r$ の関数と考えられるので、

$$\theta = f({}^{p_i} r) \quad (11)$$

と書ける。したがって、

$$\dot{\theta} = \frac{\partial f}{\partial {}^{p_i} r} \cdot {}^{p_i} \dot{r} \quad (12)$$

である。式(10)および(12)を組み合わせることにより、

$$\dot{\theta} = J_\theta J_x \dot{X}^m \quad (13)$$

ここで、

$$J_\theta = \frac{\partial f}{\partial {}^{p_i} r} \quad (14)$$

を得る。式(14)が、速度 x_m と θ との関係を表す関係式である。本論文で試作したようなパラレルリンク機構には種々の特異点が存在し、制御困難となる位置・姿勢が比較的広範囲に存在することが知られている。この幾何学的特異点は、種々の位置・姿勢に対し式(13)

の J_x, J_y の特異性を調べることによりあらかじめ知ることができる⁽⁷⁾。なお、詳細は省略するが、試作装置に対し上記特異性評価シミュレーションを行い、特異点に入らない範囲で x_m の目標値を設定するようにしている。

3. 信号処理方法と高速並列計算システム

3-1 信号処理方法 開発した装置では自動車などの6自由度実走行加速度をできるだけ忠実に再現することを目的としている。しかし、実車両の運動範囲（平面運動に関しては無限）に対し、装置の可動範囲は限られているので実車運動データをそのまま装置の目標値として与えることはできない。そこで、本論文では、以下に示す3つのアルゴリズムを組み合わせ実車運動の再現を行っている（Fig. 5）。

1) 人間の体性感覚には閾値（研究者により異なるが、前後左右方向：約 $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 以下では不感であるといわれている）が存在することを利用して、各自由度方向の低周波成分を3次のバターズ型ハイパスフィルタにより除去する。この処理により可動範囲を制限する。なお、本装置の応答周波数（約 10 Hz ）以上の成分についても1次バターズ型ローパスフィルタにより除去している。

2) 実験条件によっては、装置の可動範囲のみで上記カットオフ周波数を設定すると、車両の主要な運動が除去されてしまう場合がある（たとえば、緩やかに加減速を行う場合やスラローム走行の場合）。その場合には、カットオフ周波数を低めに設定し、装置の可動範囲を保証するため、加速度を全体に小さくする処理（スケール処理）を行う。

3) 上記各自由度方向のカットオフ周波数およびスケールゲインは、使用する実車加速度データを用いて振動ベースの運動シミュレーションを行い、装置の可動範囲を越えないように、また、閾値以上の成分ができるだけ除去されないようにその都度設定する。通常は上記のアルゴリズムによって装置の可動範囲を超えることはないが、設定ミスなども考慮し、安全の

ため各自由度方向の移動量に上限を設定している（飽和処理）。

上記1)および2)の処理は加速度のままで行えるが、飽和処理は位置（角度）での処理が必要であるため1)および2)の処理を行った後の加速度目標信号を2回積分し、位置目標に変換した後飽和処理を行っている。

以上の処理は、ウォッシュアウトアルゴリズム⁽⁶⁾、⁽⁹⁾として知られている処理とほぼ同様である。ただし、通常は上記2)において除去した並進方向の低周波成分を再現するため、除去分を回転方向に加える（重力加速度の分力成分を利用する）処理を行うのに対し、本論文ではそのような処理を行っていない。その理由は、1)従来行われる処理法では、並進方向の加速度が実際に近づくが、逆に回転方向の加速度が実際とはかなり異なってしまうという問題点があり、従来の方法が必ずしも最適とはいえない、2)本論文では車両の比較的高い周波数領域（約 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 程度）での人間-自動車系の評価を目的としているためである。

3-2 高速並列計算システム 以上に示した6自由度方向の信号処理と第2章で示した座標変換演算をリアルタイムで行うため、Fig. 6に示すような高速並列計算システムを開発した。本システムは、2個の通常型32ビットCPUと6個の32ビット浮動小数点DSP（Digital Signal Processor）をアレイ状に配置し並列演算を可能にしている。また、各プロセッサ間に8kバイトデュアルポートメモリを配置することにより、各プロセッサの独立性を高め並列処理の高効率化を実現している。なお、本システムの演算性能のピーク値は約 80 MFLOPS （Floating Point Operations per Sec.）であり、振動ベースの制御に必要な全ての計算を 1 ms 以内で実行できることを確認している。パラレルリンク機構の制御は各関節ごとに通常的位置制御（PID制御）を行っているのであるが、上記高速計算システムによって目標値を 1 ms ごとに更新することによって高応答特性を実現している。

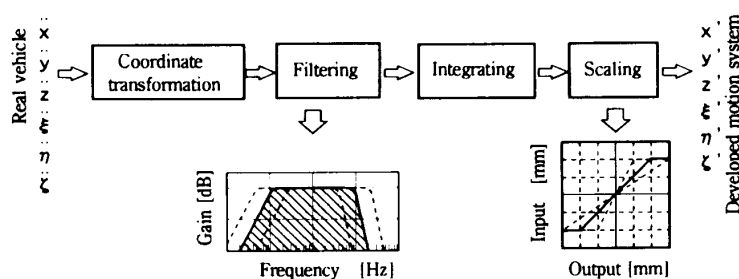


Fig. 5 Overview of signal processing method

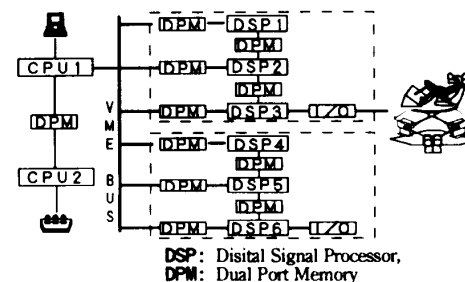


Fig. 6 Overview of parallel computing system

5. 実験結果

試作した6軸電動動揺・振動付加機構の性能をTable 1に示す。また、Fig. 7は、 y - ξ 方向の可動範囲をシリンダ機構を用いた従来のStewart Platformの場合と比較した結果である。なお比較の条件は、それぞれの最大高さが同一（同一建物内に設置する場合を想定）および y , ξ 以外のパラメータを固定（それぞれ y 方向変位が最大となる位置）した。Fig. 7に示すように、 y - ξ 平面の第1および第3象限において、本装置は従来型装置に比べ約2倍程度広い領域を移動できることが分かる。これは、従来型装置で用いているシリンダ型アクチュエータではデッドスペースが大きく、（最大/最小ストローク） < 2 であるのに対し、本装置の5角形リンク機構ではそのようなデッドスペースが存在せず等価的（最大/最小ストローク） > 2 にできるためである。したがって、逆に可動領域が同一という条件で比較すると、本装置は従来装置よりも小さくすることが可能である。

試作したような装置では、重力の影響のため上下（ z 軸）方向の負荷が最も大きい。そこで、 z 軸方向目標値として振幅が10mmのサイン波を入力し、周波数応答特性を計測した結果をFig. 8に示す。応答限界の基準を振幅ゲインで -3dB 、位相遅れで 90deg とすると、

Table 1 Specification of developed system

Driving source	AC servo motor
Payload	300 kg
Output acceleration	2G
Responsibility	DC ~ 8 Hz
Translational amplitude	± 500 mm
Rotational amplitude	30deg
Total weight	約400kg
Power source	AC200V 7.2kw

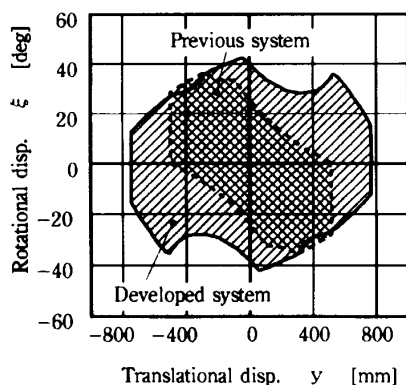


Fig. 7 Comparison of work area (y - ξ direction)

Fig. 8より本装置はほぼ8 Hzまで応答しており、最も負荷条件の厳しい上下方向においてほぼ目標性能を達成していることが分かる。また、実車の突起乗り越し走行時の上下方向加速度を本装置で再現した際の加速度波形比較結果をFig. 9に示す。Fig. 9において約0.5secの時点で発生している加速度のピークが突起乗り越しに対応するが、加速度波形においても本装置が入力波形を比較的良く再現していることが分かる。なお、0~2 secにおいて、本装置の再現波形が全体に負の方向に移動しているが、これは、第3章で示したウォッシュアウトアルゴリズムの影響である。

つぎに、サスペンションの特性のみが異なる2車両を用い、高速道路の同一区間を100km/hで約10min走行した際の車両加速度を計測し、本装置で再現した結果をFig. 10に示す。Fig. 10ではそれぞれの車両に対し、実測および本装置により再現した加速度のうち並進3成分のポワースペクトル密度を計算し比較してある。車両AおよびBは、それぞれサスペンションがごく普通の車両より少し硬いおよび柔い設定となっている。Fig. 10に示すように、本装置は並進3方向の加速度に関し、約0~10 Hzの範囲で実車両のサスペンションのわずかな差違を良く再現しており、本装置が人間-車両系の研究に有効であることが分かる。なお、ここでの実車両加速度計測には新しく開発した6軸加速度計を用いている。なお、本6軸加速度計については別報にて報告する予定である

6. 結 言

車両などの運動再現を目的としてACサーボモータを用いた高負荷6自由度パラレルリンクマニピュレータを試作し、つぎの結論を得た。

- 1) 5角形リンクを応用したパラレルリンク機構により、電動方式でもペイロード: 300kg, 最大発生加速度: 2G を実現できることを実験的に確認した。
- 2) 提案したパラレルリンク機構はリニアシリンダを用いた機構に比べ、小型にもかかわらず大きな可動

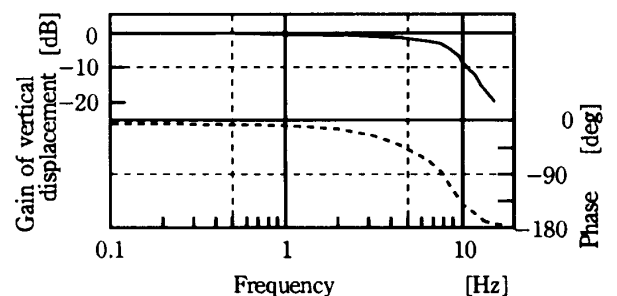


Fig. 8 The response characteristic (z direction)

領域を得ることができる。

3) 実車両走行時の加速度データを本試作装置で再現した結果、本装置が約8 Hz程度まで応答することを実験的に確認した。

以上に示したように、本試作システムは人間-自動車系の研究に必要と考えられる約0~8 Hzの範囲において、実車両運動を比較的精度良く再現可能である。現在は、人間-自動車系の種々の研究テーマへの応用を目的として、試作した振動ベース上に視野角約150 degの映像提示装置、走行音発生装置および簡易運転席を設置し、実車走行時の映像・音・振動・動揺を再現できるようになっており、人間の多自由度振動感受性評価に利用している (Fig. 11)。

文 献

- (1) 田中, 山本, 統合感覚としての運動感覚評価手法の研究, 日産技報, Vol. 33(1993), 124.
- (2) Akutsu, Y. et al., A New Analytical Method for Improving Ride Comfort, Nissan Tech. Rep. Vol. 33(1993), 113.
- (3) 林, 車両運動シミュレータの動向, 自動車技術, Vol. 36, No. 3(1982), 256.
- (4) Miki, K. et al., Dynamic Characteristics of Motor Vehicles on Drum Tester, SAE Paper 861374(1986).
- (5) Fichter, E. F., A Stewart Platform Based Manipulator, IJRR, 5(2)(1986), 157.
- (6) Johannes D. et al., The Daimler-Benz Driving Simulator A Tool for vehicle Development, SAE Paper 850334(1986).
- (7) 内山ほか4名, 6自由度高速パラレルロボット HEXAの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 3(1994), 117.
- (8) Kawamura, S. et al., Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON using Wire Drive System, 1995 IEEE Int. Conf. on R. & A., Vol. 1(1995), 215.
- (9) Raphael, S. et al., An Optimal Control Approach to the Design of Moving Flight Simulators, IEEE Tras. on Sys., Man and Cyber. vol. SMC-12, No. 6(1982), 818.

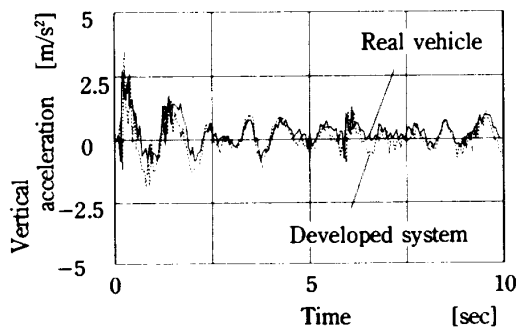


Fig. 9 The reproduced result of vertical acceleration

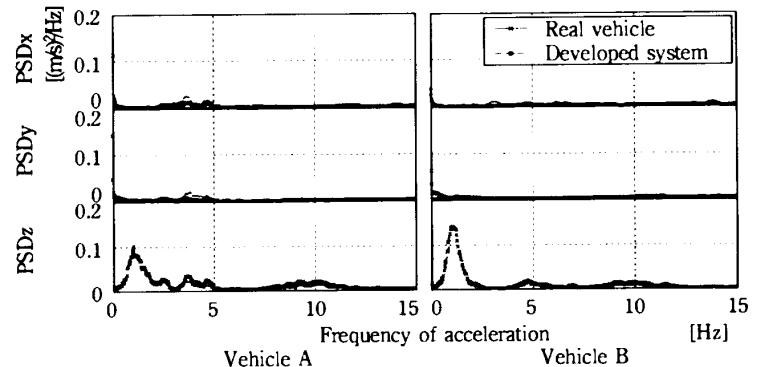


Fig. 10 Reproducibility of vehicle motion

(PSD: Power Spectrum Density of acceleration)

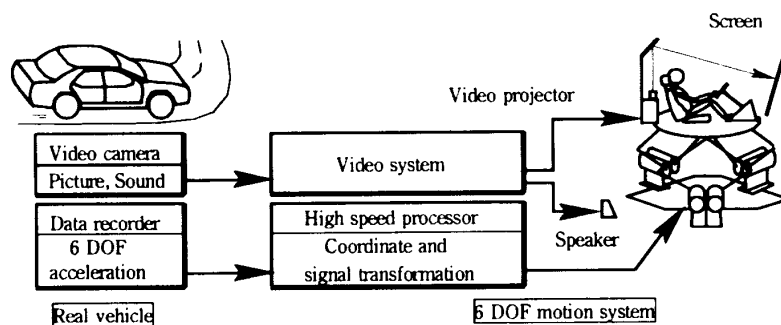


Fig. 11 A new analytical system for evaluating motion sensation