パワーショベルにおける人間ハンティング現象の解析と制御*

新井 史人^{*1}, 立石 淳^{*2}
福田 敏男^{*3}, 宮田 圭介^{*4}Dynamical Analysis and Suppression of Human Hunting
in the Excavator OperationFumihito ARAI^{*5}, Jun TATEISHI,
Toshio FUKUDA and Keisuke MIYATA^{*5} Nagoya University, Dept. of Micro System Engineering,
1, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

Construction vehicle is widely used in construction works. Especially in town area, a small-sized construction vehicle is often used, since it is usable in narrow place and low cost. However, the small-sized construction vehicle has characteristic problem of human hunting, and it make difficult to operate. This paper deals with Human Hunting phenomena (HHP), which is one of the coupled vibration phenomena between the vehicle and the operator on board, appearing at the operation of the small-sized excavator and degrades operativity. This phenomena is related not only to the vehicle dynamical characteristic but also to human-operator's dynamical characteristic. To analyze this phenomenon, it is necessary to consider the vehicle-operator dynamic model. We derived a mathematical model, which has six degrees of freedom to analyze this phenomenon. Up and down motion of the excavator-boom is simulated. And it agrees with the phenomenon well. The linearized mathematical model shows that some control lever parameters are related to stability criterion. By simulation, it is confirmed that the proper selected control parameters can suppress the HHP.

Key Words: Construction Vehicle, Human Dynamics, Simulation, Vibration

1. はじめに

近年, 建設現場において建設機械は欠かせないものとなっている。また, 市街地などでの建設現場では, 取回しのしやすさ, 運用コストの安さなどで小形, 軽量の建設機械が必要とされている。一方小形軽量であることで, その動特性は独特のものとなり, 小形機特有の問題が存在する。小形建設機械は, その軽量性のために, その動特性は作業環境やさらには自らの動作のフィードバックによる影響を受けやすいといった欠点を持ち, そのことが小形建機の操作の難しさとなっている。

今回対象とする, 小形パワーショベルにおける人間ハンティング現象は前述の問題の一つとして挙げられている。この問題は小形パワーショベルの作業機操作時において振動が発生し, その振動が発散していく現象で, その現象の発生および発散の過程にはオペレータ

の挙動が操作系に与える影響が関係しているものと思われる。

現在, 建設機械等の設計において, 振動対策についての配慮はもちろん成されているものの, そのほとんどは車体系の特性についてのみの考慮しかされていないか, されていたとしても乗り心地の観点からのみであり, 車体-オペレータ系の連成振動が操作系に与える影響について理論的に解明されていない。

本論文では車体-オペレータの連成振動が操作系に与える影響についての定性的な考察をするために車体-オペレータおよび操作系を含めた連成振動系のモデルを構築し, 車体-オペレータおよび操作系を含めた振動特性解析を目的としたシミュレーションシステムを構築し, その特性についての解析を行う。また, これを防止するための制御方法について考察し, シミュレーションを通して有効性を検討する。

2. システムのモデル化

2.1 モデル構成 小形パワーショベル-オペレータ系のモデル化を行う。まず車体系について, 対象とする小形パワーショベルは前後移動, 旋回動作, ブーム起伏動作, ブーム曲げ動作など, 多様な動作が可能であるが, ハンティング現象が顕著にあらわれるのは

* 原稿受付 1999年4月30日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)。*² 名古屋大学大学院工学研究科。*³ 正員, 名古屋大学先端技術共同センター。*⁴ 正員, コマツ システム開発センタ (〒254-0913 平塚市万田1200)。

E-mail: arai@mean.nagoya-u.ac.jp

ブームの起伏動作および移動動作である。そこで今回は(1)パワーショベルのブームの起伏動作のみに着目、(2)移動動作および旋回動作については対象としない、また、オペレータおよび操作系については、(3)オペレータの前後方向の挙動のみを対象とし、(4)操作ジョイスティックも回転のみの1自由度のものとする、(1)～(4)の仮定により運動は鉛直平面で起きるものとし、系を二次元モデルとして構築する。またブームの曲げ動作は対象とせず、起伏運動中はブームの形状は変化しないものとする。

ブームの起伏動作は速度制御によって行われ、速度指令値はジョイスティックの変位角に定数ゲイン K を乗じたもの $\dot{\phi} = K\alpha$ によって与えられる。

車体—オペレータ系全体のモデルを図1に、オペレーター操作系の部分のモデルを図2に示す。モデルはパワーショベル車体、ブーム、ジョイスティック、オペレータ上半身より構成され、各部は回転軸により連接される。パワーショベルと地面との接触については車体前部および後部でばねおよびダンパによって地面につながれているものとする。また、オペレータ上半身肩部と操作レバー握り部は、ばねおよびダンパによって連接され、このばねおよびダンパを腕のモデルとする。パラメータを以下のように定める。

m_i , ($i=0, 1, \dots, 3$): パワーショベル車体、ブーム、オペレータ上半身、操作レバー質量
 J_i , ($i=0, 1, \dots, 3$): 各部の重心回り慣性モーメント
 l_i , ($i=0, 1, \dots, 5$): パワーショベル車体各部の寸法
 l_b : 腰部回転軸からオペレータ上半身重心位置寸

Fig. 1 Excavator-operator model

Fig. 2 Operator-joystic model

法

l_{b1} : 腰部回転軸からオペレータ肩部位置寸法

l_s : 操作レバー寸法

x, y : 慣性系に対するパワーショベル車体とブーム
連接部位置

ω : パワーショベル車体ピッチング角

ϕ : パワーショベル車体に対するブーム起伏角

γ : パワーショベル車体に対するオペレータ上半
身相対角度

α : 操作レバー操作角

α_1 : 操作レバー操作目標角

x_f, y_f : 車体前部位置

x_r, y_r : 車体後部位置

O_0 : 車体とブームの連接部回転軸

O_1 : オペレータ腰部回転軸

O_2 : ジョイスティック回転軸

k_{xf} : 車体前部支持点の x 方向ばね定数

k_{yf} : 車体前部支持点の y 方向ばね定数

k_{xr} : 車体後部支持点の x 方向ばね定数

k_{yr} : 車体後部支持点の y 方向ばね定数

C_{xf} : 車体前部支持点の x 方向粘性減衰係数

C_{yf} : 車体前部支持点の y 方向粘性減衰係数

C_{xr} : 車体後部支持点の x 方向粘性減衰係数

C_{yr} : 車体後部支持点の y 方向粘性減衰係数

k_γ : オペレータ腰部関節ばね定数

C_γ : オペレータ腰部関節粘性減衰係数

k_a : ジョイスティックばね定数

C_a : ジョイスティック粘性減衰係数

k_s : オペレータ腕部ばね定数

C_s : オペレータ腕部粘性減衰係数

2.2 数学モデル 運動方程式の導出にあたり、

始めに各重心位置の座標を次のように表す。

● 車体重心位置

$$\begin{cases} x_0 = x - l_0 \\ y_0 = y - l_0 \omega \end{cases} \quad (1)$$

● ブーム重心位置

$$\begin{cases} x_1 = x + l_1 \cos(\phi + \omega) \\ y_1 = y + l_1 \sin(\phi + \omega) \end{cases} \quad (2)$$

● オペレータ上半身重心位置

$$\begin{cases} x_2 = x - l_2 - l_4 \omega - l_b \sin(\gamma + \omega) \\ y_2 = y + l_4 - l_2 \omega + l_b \cos(\gamma + \omega) \end{cases} \quad (3)$$

● 操作レバー重心位置

$$\begin{cases} x_3 = x - l_3 - l_s \omega - \frac{l_s}{2} \sin(\alpha + \omega) \\ y_3 = y + l_3 - l_s \omega + \frac{l_s}{2} \cos(\alpha + \omega) \end{cases} \quad (4)$$

車体前部および後部の座標は次のようになる

●車体前部

$$\begin{cases} x_f = x + l_{0f} \\ y_f = y + l_{0f}\omega \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{cases} x_r = x - l_{0r} \\ y_r = y - l_{0r}\omega \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

オペレータの肩部およびジョイスティック握りの座標は次のようになる。

●肩部

$$\begin{cases} x_{\text{shoulder}} = x - l_2 - l_4\omega - l_{b1} \sin(\gamma + \omega) \\ y_{\text{shoulder}} = y + l_4 - l_2\omega + l_{b1} \cos(\gamma + \omega) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

●ジョイスティック握り

$$\begin{cases} x_{\text{grip}} = x - l_3 - l_5\omega - l_s \sin(\alpha + \gamma) \\ y_{\text{grip}} = y + l_5 - l_3\omega + l_s \cos(\alpha + \gamma) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

多自由度系の振動系である為、系全体の運動エネルギー T 、位置によるポテンシャルエネルギー V 、ばねによるポテンシャルエネルギー U 、消散エネルギー C 、および一般力 Q_r 、を求め、ラグランジュの方程式により運動方程式を導出する、各エネルギーは次のようになる。

運動エネルギー

$$\begin{aligned} T = & 0.5(J_0\dot{\omega}^2 + J_3(\dot{\alpha} + \dot{\omega})^2 + J_2(\dot{\gamma} + \dot{\omega})^2 \\ & + J_1(\dot{\phi} + \dot{\omega})^2 + m_2(l_b(\cos \gamma - \omega \sin \gamma) \dot{\gamma} \\ & + (l_4 + l_b \cos \gamma)\dot{\omega} - \dot{x})^2 + (l_b(\sin \gamma + \cos \gamma\omega) \dot{\gamma} \\ & + (l_2 + l_b \sin \gamma)\dot{\omega} - \dot{y})^2) \\ & + m_0(\dot{x}^2 + (-l_0\dot{\omega} + \dot{y})^2) \\ & + m_1((l_1(\sin \phi + \omega \cos \phi)\dot{\phi} + l_1 \sin \phi \dot{\omega} - \dot{x})^2 \\ & + (l_1(\cos \phi - \sin \phi)\dot{\phi} + l_1 \cos \phi \dot{\omega} + \dot{y})^2) \\ & + m_3((-l_5\dot{\omega}) - 0.5l_s((\cos \alpha - \omega \sin \alpha)\dot{\alpha} \\ & + \dot{\omega} \cos \alpha) + \dot{x})^2 + (-0.5l_s(\sin \alpha + \omega \cos \alpha)\dot{\alpha} \\ & + (-l_3 - 0.5l_s \sin \alpha)\dot{\omega} + \dot{y})^2) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

位置エネルギー

$$\begin{aligned} V = & g(m_0(-(l_0\omega) + y) + m_1(l_1(\sin \phi + \omega \cos \phi) + y) \\ & + m_3(l_5 - l_3\omega + 0.5l_s(\cos \alpha - \omega \sin \alpha) + y) \\ & + m_2(l_4 - l_2\omega + l_b(\cos \gamma - \omega \sin \gamma) + y)) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ばねによるポテンシャルエネルギー

$$\begin{aligned} U = & 0.5(k_a\alpha^2 + k_r\gamma^2 + k_s(-(l_s\alpha) - l_s\alpha \\ & + l_{b1}\gamma)^2 + k_{xf}x^2 + k_{xr}x^2 + k_{yf}(l_0a\omega + y)^2 \\ & + k_{yr}(-(l_0b\omega) + y)^2) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ダンパによる消散エネルギー

$$\begin{aligned} C = & 0.5(c_a\dot{\alpha}^2 + c_r\dot{\gamma}^2 + c_s(-(l_s\dot{\alpha}) \\ & + l_{b1}\dot{\gamma})^2 + c_{xf}\dot{x}^2 + c_{xr}\dot{x}^2 + c_{yf}(l_0a\dot{\omega} + \dot{y})^2 \\ & + c_{yr}(-(l_0b\dot{\omega}) + \dot{y})^2) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

Lagrange の方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} + \frac{\partial V}{\partial q_s} + \frac{\partial U}{\partial q_s} + \frac{\partial C}{\partial \dot{q}_s} = Q_s \dots\dots (13)$$

Lagrange 方程式より次の運動方程式が導出される。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{16} \\ a_{21} & \cdots & a_{26} \\ a_{31} & \cdots & a_{36} \\ a_{41} & \cdots & a_{46} \\ a_{51} & \cdots & a_{56} \\ a_{61} & \cdots & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\omega} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_\phi \\ 0 \\ \tau_a \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ただし

$$\begin{aligned} a_{11} &= m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \\ a_{12} &= 0.0 \\ a_{13} &= -(l_4m_2 + l_5m_3 + 0.5l_sm_3 \cos \alpha \\ & \quad + l_b m_2 \cos \gamma + l_1 m_1 \sin \phi) \\ a_{14} &= l_1 m_1 (-\omega \cos \phi - \sin \phi) \\ a_{15} &= l_b m_2 (\omega \sin \gamma - \cos \gamma) \\ a_{16} &= -0.5l_s m_3 (-\omega \sin \alpha + \cos \alpha) \\ a_{21} &= 0.0 \\ a_{22} &= m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \\ a_{23} &= -(l_0 m_0 + l_2 m_2 + l_3 m_3 - l_1 m_1 \cos \phi \\ & \quad + 0.5l_s m_3 \sin \alpha + l_b m_2 \sin \gamma) \\ a_{24} &= l_1 m_1 (-\omega \sin \phi + \cos \phi) \\ a_{25} &= l_b m_2 (-\omega \cos \gamma - \sin \gamma) \\ a_{26} &= 0.5l_s m_3 (-\omega \cos \alpha - \sin \alpha) \\ a_{31} &= -(l_4 m_2 + l_5 m_3 + 0.5l_s m_3 \cos \alpha \\ & \quad + l_b m_2 \cos \gamma + l_1 m_1 \sin \phi) \\ a_{32} &= -(l_0 m_0 + l_2 m_2 + l_3 m_3 + 0.5l_s m_3 \sin \alpha \\ & \quad + l_b m_2 \sin \gamma - l_1 m_1 \cos \phi) \\ a_{33} &= l_0^2 m_0 + l_1^2 m_1 + (l_4^2 + l_b^2 + l_2^2 + 2.0l_4 l_b \cos \gamma \\ & \quad + 2.0l_b l_2 \sin \gamma) m_2 \\ & \quad + (l_s^2 + 0.25l_s^2 + l_3^2 + l_5 l_s \cos \alpha + l_s l_3 \sin \alpha) m_3 \\ & \quad + J_0 + J_1 + J_2 + J_3 \\ a_{34} &= l_1^2 m_1 + J_1 \\ a_{35} &= l_b m_2 (l_b + l_4 \cos \gamma + l_2 \sin \gamma + l_2 \omega \cos \gamma \\ & \quad - l_4 \omega \sin \gamma) + J_2 \\ a_{36} &= 0.25l_s m_3 (l_s + 2.0l_5 \cos \alpha + 2.0l_3 \sin \alpha \\ & \quad + 2.0l_3 \omega \cos \alpha - 2.0l_5 \omega \sin \alpha) + J_3 \\ a_{41} &= l_1 m_1 (-\omega \cos \phi - \sin \phi) \\ a_{42} &= l_1 m_1 (-\omega \sin \phi + \cos \phi) \\ a_{43} &= l_1^2 m_1 + J_1 \\ a_{44} &= l_1^2 m_1 (1 + \omega^2) + J_1 \\ a_{45} &= 0.0 \\ a_{46} &= 0.0 \\ a_{51} &= l_b m_2 (-\cos \gamma + \omega \sin \gamma) \\ a_{52} &= l_b m_2 (-\sin \gamma - \omega \cos \gamma) \\ a_{53} &= l_b m_2 (l_b + l_4 \cos \gamma + l_2 \sin \gamma + l_2 \omega \cos \gamma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -l_4\omega \sin \gamma)+J_2 \\
 a_{54} & =0.0 \\
 a_{55} & =l_b^2 m_2(1+\omega^2)+J_2 \\
 a_{56} & =0.0 \\
 a_{61} & =0.5 l_s m_3(-\cos \alpha+\omega \sin \alpha) \\
 a_{62} & =0.5 l_s m_3(-\sin \alpha-\omega \cos \alpha) \\
 a_{63} & =0.25 l_s m_3(l_s+2.0 l_5 \cos \alpha+2.0 l_3 \sin \alpha \\
 & +2.0 l_3 \omega \sin \gamma-2.0 l_5 \omega \sin \alpha)+J_3 \\
 a_{64} & =0.0 \\
 a_{65} & =0.0 \\
 a_{66} & =0.25 l_s^2 m_3(1+\omega^2)+J_3 \\
 b_0 & =-1((k_{xf}+k_{xr})x+0.5 l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\alpha}(\sin \alpha \\
 & +\omega \cos \alpha)+l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\gamma}(\sin \gamma+\omega \cos \gamma) \\
 & -l_1 m_1 \dot{\phi} \dot{\phi}(\cos \phi-\omega \sin \phi)+l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\omega} \sin \alpha \\
 & +2.0 l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\omega} \sin \gamma-2.0 l_1 m_1 \dot{\phi} \dot{\omega} \cos \phi \\
 & +(c_{xf}+c_{xr}) \dot{x}) \\
 b_1 & =-1((k_{yf}+k_{yr})y+(k_{yf} l_{of}-k_{yr} l_{or})\omega \\
 & -0.5 l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\alpha}(\cos \alpha-\omega \sin \alpha) \\
 & -l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\gamma}(\cos \gamma-\omega \sin \gamma) \\
 & -l_1 m_1 \dot{\phi} \dot{\phi}(\sin \phi+\omega \cos \phi)-l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\omega} \cos \alpha \\
 & -2.0 l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\omega} \cos \gamma-2 l_1 m_1 \dot{\phi} \dot{\omega} \sin \phi \\
 & +(c_{yf}+c_{yr}) \dot{y}+(m_0+m_1+m_2+m_3)g \\
 & +\dot{\omega}(c_{yf} l_{of}-c_{yr} l_{or})) \\
 b_2 & =-1((k_{yf} l_{of} l_{of}+k_{yr} l_{or} l_{or})\omega+(k_{yf} l_{of}-k_{yr} l_{or})\dot{y} \\
 & -0.5 l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\alpha}(-l_3 \cos \alpha+l_5 \sin \alpha+0.5 l_s \omega \\
 & +l_5 \omega \cos \alpha+l_3 \omega \sin \alpha) \\
 & +l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\gamma}(l_2 \cos \gamma-l_4 \sin \gamma-l_6 \omega \\
 & -l_4 \omega \cos \gamma-l_2 \omega \sin \gamma) \\
 & -l_1 l_1 m_1 \omega \dot{\phi} \dot{\phi}+(c_{yf} l_{of} l_{of}+c_{yr} l_{or} l_{or})\dot{\omega} \\
 & +l_s m_3 \dot{\alpha} \dot{\omega}(l_3 \cos \alpha-l_5 \sin \alpha) \\
 & +2.0 l_b m_2 \dot{\gamma} \dot{\omega}(l_2 \cos \gamma-l_4 \sin \gamma) \\
 & +\dot{y}(c_{yf} l_{of}-c_{yr} l_{or})-(l_0 m_0+l_2 m_2+l_3 m_3 \\
 & -l_1 m_1 \cos \phi+0.5 l_s m_3 \sin \alpha+l_b m_2 \sin \gamma)g) \\
 b_3 & =-1(2 l_1 l_1 m_1 \omega \dot{\phi} \dot{\phi}-f_1(q_1 f_2(\alpha-q_2)-\dot{\phi})) \\
 b_4 & =-1(k_s l_{b1} l_s \alpha-k_s l_{b1} l_s \alpha+k_s l_{b1}^2 \gamma+k_{ga} \gamma \\
 & +c_s l_{b1}(l_{b1} \dot{\gamma}-l_s \dot{\alpha})+(c_{ga}+2 l_s^2 m_2 \omega \dot{\omega}) \dot{\gamma} \\
 & +l_b m_2 g(-\omega \cos \gamma-\sin \gamma) \\
 & -l_b m_2 g(-\omega \cos \gamma-\sin \gamma)) \\
 b_5 & =-1(-k_s l_s^2 \alpha_1+k_s l_s^2 \alpha-k_s l_{b1} l_s \gamma \\
 & +c_s l_s(l_s \dot{\alpha}-l_{b1} \dot{\gamma})+k_{at}(\alpha-\alpha_1) \\
 & +(c_{at}+0.5 l_s^2 m_3 \omega \dot{\omega}) \dot{\alpha} \\
 & +0.5 l_s m_3 g(-\omega \cos \alpha-\sin \alpha))
 \end{aligned}$$

とする。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーションシステム構成 2章で構

築したモデルを用いて数値シミュレーションを行い、モデルの妥当性に対する検証および、現象に対する考察を行う。シミュレーションは2章の数学モデルから得られた、非線形運動方程式をRunge-Kutta法を用いて計算するシミュレータプログラムを作成して行う。プログラムはC言語によって作成し、ワークステーション上で動作する。

数学モデルの各パラメータは次のようになる、パラメータの値の決定は重量3500 kgのパワーショベルの値を基にして以下のように設定している。

$$\begin{aligned}
 l_{of} & =0.1 \text{ m}, l_{or}=1.5 \text{ m}, l_b=0.8 \text{ m}, l_1=2.8 \text{ m}, \\
 l_2 & =1.2 \text{ m}, l_3=0.8 \text{ m}, l_b=0.5 \text{ m}, l_{b1}=0.7 \text{ m}, \\
 l_s & =0.4 \text{ m}, h_2=1.0 \text{ m}, h_3=1.0 \text{ m} \\
 m_0 & =2800.0 \text{ kg}, m_1=300.0 \text{ kg} \\
 m_2 & =40.0 \text{ kg}, m_3=0.5 \text{ kg} \\
 J_0 & =1122.0 \text{ kgm}^2, J_1=627.0 \text{ kgm}^2, \\
 J_2 & =0.8 \text{ kgm}^2, J_3=0.007 \text{ kgm}^2 \\
 k_{xf} & =180000.0 \text{ N/m}, k_{yf}=180000.0 \text{ N/m}, \\
 k_{xr} & =180000.0 \text{ N/m}, k_{yr}=180000.0 \text{ N/m}, \\
 k_\gamma & =50.0 \text{ N/m}, k_\alpha=10.0 \text{ N/m}, k_s=300.0 \text{ N/m} \\
 C_{xf} & =400.0 \text{ Ns/m}, C_{yf}=1000.0 \text{ Ns/m}, \\
 C_{xr} & =400.0 \text{ Ns/m}, C_{yr}=1000.0 \text{ Ns/m}, \\
 C_\gamma & =20.0 \text{ Ns/m}, C_\alpha=0.2 \text{ Ns/m}, C_s=20.0 \text{ Ns/m} \\
 K & =2.0
 \end{aligned}$$

3.2 シミュレーションによる人間ハンティング現象

再現 システム検証も兼ねて、人間ハンティング現象のシミュレーション上での再現を行う。前述のとおり、人間ハンティング現象はブームの起伏動作中に顕著に表れるものと思われる。そのため、シミュレーションにあたっては、ブームを上げた状態からの下げ動作について行う。

オペレータに対する仮定として腰部および腕部のインピーダンスは一定値であり、またオペレータはジョイスティック入力値を一定値に保つような入力を行っているものとしている。シミュレーション条件を次のようにする。

- 初期状態でパワーショベルはブームを上げた状態($\phi=1.4 \text{ rad}$)で静止している。
- オペレータはジョイスティック入力によりブームに $\dot{\phi}=-0.2 \text{ rad/s}$ の速度指令値を与え、そのままその姿勢を維持する。

- シミュレーションは運動開始を0.0秒とし4.0秒まで行う。

シミュレーションを行い、結果を以下に示す。挙動の観察は、次の値に注目して行う。

オペレータ上半身変位角 γ

ジョイスティック変位角 α

パワーショベル車体変位角 ω , 車体 x 方向変位

車体 y 方向変位, ブーム角度 ϕ

シミュレーション開始時 0.0 s での各変数の初期値はブームを上げた状態での静的な釣り合い位置より与えられ, 以下のようにになっている.

$$x=0.0 \text{ m}, \dot{x}=0.0 \text{ m/s}, y=-0.035208 \text{ m},$$

$$\dot{y}=0.0 \text{ m/s}, \omega=-0.002196 \text{ rad},$$

$$\dot{\omega}=0.0 \text{ rad/s}, \phi=1.4 \text{ rad}$$

$$\dot{\phi}=0.0 \text{ rad/s}, \gamma=0.0 \text{ rad}$$

$$\dot{\gamma}=0.0 \text{ rad/s}, \alpha=0.0 \text{ rad}, \dot{\alpha}=0.0 \text{ rad/s},$$

シミュレーション結果を以下に示す, オペレータ上半身変位角 γ を図 3 に, ジョイスティック変位角 α を図 4 に, パワーショベル車体変位角 ω を図 5 に, 車

体 x 方向変位を図 6 に, 車体 y 方向変位を図 7 に, また, ブーム角度 ϕ を図 8 に示す.

3・3 結果に対する考察 計算の結果を見ると動作とともに振動が発生し, 発散していくのがわかる. オペレータの上半身角度 γ の位相とジョイスティック角度 α の位相は一致しており, ジョイスティック入力値の変動がオペレータ上半身の挙動の影響を受けているものと推測できる. またパワーショベル車体角度 ω の位相とオペレータ上半身角度 γ の位相は逆になっておりオペレータの上半身の挙動はパワーショベル車体の挙動によりもたらされていることが推測できる. このことからハンチング現象は次のような過程でとらえることができるものと考えられる.

●オペレータによるジョイスティック入力によりブー

Fig. 3 Operator body angle γ

Fig. 4 Joystick angle α

Fig. 5 Excavator body angle ω

Fig. 6 Excavator body position x

Fig. 7 Excavator body position y

Fig. 8 Excavator boom angle ϕ

ムにトルクが与えられる。

●ブームに与えたトルクの反作用がパワーショベルの車体に与えられ、車体の角度変位が起きる。

●慣性力により、車体の角度変位に対して、オペレータの上半身角度の変位に遅れが生じ、お互いの相対角度が変化する。

●オペレータ上半身の挙動がジョイスティックに伝わり、入力値の急激な変化が起き、以後これが繰返される。

このような過程で人間ハンチング現象が発生しているものと考えられる。

3.4 システムの安定性に関する考察 ここでシステムの安定性に対する、操作系のパラメータが与える影響に対する考察を行う。操作系のパラメータとして、ジョイスティックの粘性減衰係数 c_a と操作角度から速度入力値への定数ゲイン K を選び、それぞれのパラメータが安定性に与える影響についての検討をする。

検討にあたってはモデルの運動方程式を局所線形化近似したものを使用する。線形化近似式は、ブーム下げ動作運動開始点の周りで運動方程式をテイラー展開することで得る。線形化近似された運動方程式より導出したシステムの状態方程式を用いて特性根の配置より、システムの安定性の検討を行う。

c_a を 0.0 Ns/m より 4.0 Ns/m まで変位させたと

きのシステムの極の移動の様子を図 9 に、また図 9 の実軸の零付近を拡大した図を図 10 に示す。

K を 3.0 Ns/m より 1.0 Ns/m まで変化させたときのシステムの極の移動の様子を図 11 に、また図 12 の実軸の零付近を拡大した図を図 12 に示す。

このように操作系のパラメータの値により、システムの安定性は大きく変化することが推定できる。このため、 C_a や K を適切に調整することによりハンチングを防止することが可能であると考えられる。

4. シミュレーションによるハンチング抑制効果の検証

3章で提案したハンチング抑制手法について、その有効性を数値シミュレーションにより確認する。

3章では線形化した数学モデルに対して C_a , K の値が安定性に与える影響についての検討を行い、安定のための条件を求めた、ここでは元の非線形モデルに対してもその手法が有効であることを示すため、数値シミュレーションによる検証を行う。

パラメータ C_a , および K を適当な値に設定し、先ほどと同様のシミュレーションを行う、その他のパラメータおよび、初期値は先ほどと同一とする。シミュレーション結果を以下に示す。

4.1 パラメータ C_a を変えた場合

まず、 C_a の

Fig. 9 Pole plot (C_a : 0.0~4.0)

Fig. 11 Pole plot (K : 1.0~3.0)

Fig. 10 Pole plot (C_a : 0.0~4.0)

Fig. 12 Pole plot (K : 1.0~3.0)

Fig. 13 Operator body angle γ Fig. 17 Excavator body position y Fig. 14 Joystick angle α Fig. 18 Excavator boom angle ϕ Fig. 15 Excavator body angle ω Fig. 19 Operator body angle γ Fig. 16 Excavator body position x Fig. 20 Joystick angle α

Fig. 21 Excavator body angle ω

Fig. 23 Excavator body position y

Fig. 22 Excavator body position x

Fig. 24 Excavator boom angle ϕ

み変えた場合を図13～18に示す。ここでパラメータ設定は $C_a=4.0$ Ns/m とした。

4・2 パラメータ K を変えた場合 次に、 K のみ変えた場合を図19～24に示す。ここでパラメータ設定は $K=1.0$ とした。

4・3 結果に対する考察 C_a および K を線形化によって得られた適当な値に設定することにより、元の非線形系の系においても制振の効果が得られることが確認できた。これらの結果より、オペレータからの操作入力にかかわるパラメータがハンチング現象の発生条件にかかわることも確認できる。また、 C_a を変化させた場合にジョイスティックの目標操作角までの立ち上がり時間が長くなるなどの特徴が現れた、今後これらが操作性に与える影響などについて考察を加えていく必要があると思われる。

5. ま と め

パワーショベルでの作業時に発生する人間ハンチング現象の解析を行うため、人間-機械系のモデル化を行った。モデルに基づきシミュレーションシステムを構築し、シミュレーションによる現象再現を行い、人間ハンチング現象の定性的な説明を行った。

また操作系のパラメータにより人間ハンチング現象における安定性が変化することを示した。これは操作系の設計に役立つものと思われる。

現状では導出したモデルを用いて、ハンチング現象が起こる理由を説明できた。今後実験を通して実データとの比較を行い、提案したモデルを評価していく必要がある。また、その結果によってはより精度の高いシミュレーションが行えるよう、より複雑な人間モデルを検討していく。

文 献

- (1) 山本和夫, 非線形機械力学シミュレーション, 日刊工業新聞社, (1996), 25-76.
- (2) 長松昭男・ほか5名, ダイナミクスハンドブック, 朝倉書店, (1993), 146-157.
- (3) 前田肇・杉江俊治, システム制御理論朝倉書店, (1990), 28-50.
- (4) 辻敏夫・ほか3名, 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, 30-3(1994), 319-328.
- (5) 蔦紀夫・白傑, 人体上体系の三次元動力学モデリングと実験による力学物性の同定, 機論, 59-565, C(1993), 9.
- (6) 西山修二, 車両-乗員系連成振動シミュレーションシステムの開発(第一報, 理論解析およびシステム検証), 機論, 59-568, C(1993), 12.