

跳 躍 移 動 体 の 駆 動 制 御*

大 滝 英 征*¹, 綿 貫 啓 一*¹

Movement Control of a Small Jumping Machine

Hideyuki OHTAKI and Keiichi WATANUKI

We have developed a small jumping machine. For such machines, it is difficult to control the direction and velocity of motion by using conventional control devices, since there is not sufficient space to install them. Therefore we must develop another suitable control method. In this report, we investigate the following and movement control method of a small jumping target and elucidate its performance by analyzing graphical data extracted using a CCD camera. We propose a method of creating a virtual eye on the computer display, with which to follow a target. Moreover, we propose a controlling method of jumping direction and velocity.

Key Words: Jumping Machine, Linear Actuators, Controlling Method, Graphical Data CCD Camera

1. ま え が き

著者らは、リニアアクチュエータを跳躍のための脚部として利用した微小な跳躍移動体の製作および特性解析⁽¹⁾⁽²⁾を行ってきた。しかし、このような移動体では、容積的な制約と衝撃・振動上の問題等からセンサ類、駆動制御装置類を搭載するのは難しい。加えて、跳躍移動時に脚部が蹴る床面の状況、滞空中の動力ケーブルの状況等によって、以後の移動軌跡、速度に影響が及ぶ。

そこで、これに対処するためには、CCDカメラのような外部に設置した画像取込装置で移動体の挙動を把握、制御を加える必要がある。

その際、取込む画像領域を、移動体が移動するであろうと予想される広い領域にあらかじめ設定、固定するのでは、跳躍に伴う画像の乱れ処理をも含めると、リアルタイム的な制御は難しくなる。

そこで、本報では、取込む領域を常に移動体近傍に限るため、移動体の動きに追従して動く仮想の眼を設け、画像データを収集することとした。画像を取込むサンプリング時間を1/20秒と設定したが、その間に移動体について、画像のエッジ処理等を行い、現在位

置、速度、姿勢角を把握するとともに、次の動きに向けての情報を制御用コンピュータに送れるようにした。この方法について報告する。

2. 移動体追従のための仮想の眼

2・1 画像データの取込み 図1は本装置の概略

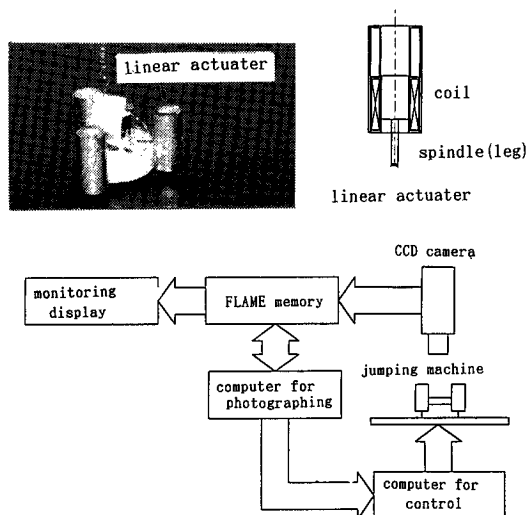


図1 跳躍移動体の駆動制御装置

* 原稿受付 1994年12月19日。

*¹ 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

を示したもので、本体は3本のリニアアクチュエータを等間隔に配置した構造をしている。制御法構築に当たって必要となる各アクチュエータの駆動法等、基礎的特性については前報にて述べた。

さて、移動体制御用コンピュータと撮影用コンピュータは独立に配備し、処理時間の短縮化を目的とした。移動体制御用コンピュータから移動体に命令が加えられると同時に、トリガ信号がRS-232C回線を通じて、撮影用コンピュータに伝達される。すると、撮影用コンピュータが動作を開始、撮影を行い、得られた画像データをフレームメモリに格納する。このデータをもとに、次の撮影時まで、移動体の位置等を算出、自身のメモリに格納するとともに、その情報をRS-232C回線を介して、移動体制御用コンピュータに送る。画像データの取込みには、CCDカメラ電源との同期をとる必要がある。そのため、フレームメモリの一点にキーコードを書き込んでおき、撮影開始指令を与える。そして、ポーリングによってその値を検出した時点で、その撮影を終了、次の撮影へと移る。撮影の最速サンプリング時間はフレームメモリの性能に依存するが、本報で使用したものは、ODD, EVEN各フレームが3枚に1枚オミットされるため、1/40秒であった。

取込んだ画像は、あらかじめ設定したしきい値で二値化処理し、処理時間の短縮化を図るとともに、CRT上でも移動状況が容易に把握できるよう、エッジ強調、空間微分等を施した。

2.2 移動体追跡のための仮想の眼 二値化処理された図形の図心位置は、撮影時の焦点ボケ、照明による外乱、しきい値等が変化しても、あまり影響を受けない。そこで、移動体追跡のために、図2に示したように、移動体の図心位置に仮想の眼の中心が常にくるようにした。仮想の眼の中心位置は (x_t, y_t) 、眼の画素数は $m \times n$ 個である。

この $m \times n$ 個の画素を二値化処理した中に、 N 個の画素からなる移動体の値が含まれているとすると、移動体の図心の座標 $G(g_x, g_y)$ は

$$\left. \begin{aligned} g_x &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{i \cdot p(i, j)}{N} \right) \\ g_y &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{j \cdot p(i, j)}{N} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$p(i, j)=1$: 画素の輝度がしきい値以上

$p(i, j)=0$: 画素の輝度がしきい値以下

追跡は、式(1)で与えられる移動体の図心と眼の中心座標との差を計算、その値が零になるように、眼の中心位置を補正して行う。ただし、眼に関しての配列が $m \times n$ であるので、眼を一度に動かせる範囲は $n/2$

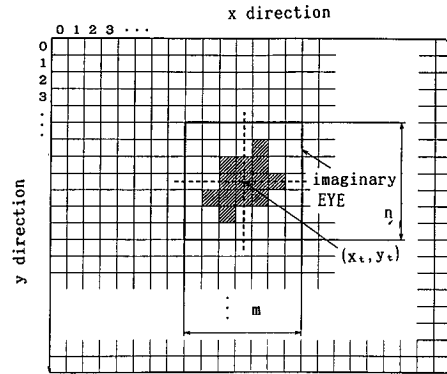


図2 移動体追跡のための仮想の眼

画素 $(n \leq m)$ 以下となる。そのため、追跡が保証できる条件は

$$v < (n/2) \cdot (1/\Delta t)$$

v : 移動体の速度

Δt : 撮影のサンプリング時間

また、移動体を見失った場合の再発見については、設定されていたしきい値を変化させ、撮影した全領域について、走査する方法をとった。しきい値以上の輝度をもつ画素を発見すると、眼の中心座標を発見した位置の座標に置き換えた上で、初期設定のしきい値に戻す。

2.3 移動体の挙動把握 移動体の駆動制御には、移動体の位置、速度、進行方向、姿勢角を把握する必要がある。以下に、これらの把握法について述べる。

(a) 速度 $v(v_x, v_y)$ 時間 t および $t + \Delta t$ に撮影された二値化画像データより、

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{g_x(t + \Delta t) - g_x(t)}{\Delta t} \\ v_y &= \frac{g_y(t + \Delta t) - g_y(t)}{\Delta t} \\ v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(b) 移動体の進行方向角 ϕ

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{v_x}{v_y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

(c) 姿勢角 ψ (移動体頭部の向いている方向角)

二値化画像データの統計的性質から求める。移動体の二値化画像全体を覆うことができる長方形の領域を図3に示したようにとると、この長方形は移動体が方向転換を図るごとに形状が変化する。この形状より移動体の姿勢角を把握する。それには、長方形領域の縦横比を考慮して行った。ここでは、図中に示したように、右上、左下の角部の座標をとり、

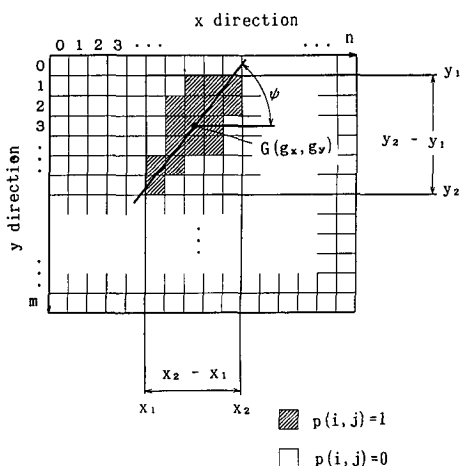


図 3 姿勢角 ψ の検出および縦横比のとり方

$$A_s = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

を指標とし、 $A_s \leq 1$ の場合は x 座標を基準にした姿勢角を、 $A_s > 1$ の場合は y 軸を基準にした姿勢角を求めることとした。

さて、取込まれた画像の x 方向、 y 方向の分散 S_x^2 , S_y^2 より、相関関数は

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{i \cdot j \cdot p(i, j)}{N} - g_x g_y}{S_x S_y} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$S_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{i \cdot p(i, j) - g_x\}^2$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{j \cdot p(i, j) - g_y\}^2$$

移動体の x 軸を基準にした姿勢角 θ は、回帰直線 ($y - g_y = K_x(x - g_x)$) の傾き K_x から与えられ、

$$\theta = \tan^{-1} K_x \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$K_x = r \frac{S_y}{S_x} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{i \cdot j \cdot p(i, j)}{N} - g_x g_y}{S_x^2}$$

y 軸を基準にした姿勢角は、 x, y を入れ替え計算すればよい。

3. 跳躍移動体の駆動制御

3.1 速度制御(直進) 進行方向を一定に維持し、移動している場合の速度制御則は、リニアアクチュエータへの印加電流と速度に関する実験結果を勘案し、

$$I = I_0 + I_k \cdot v + K_v(v_r - v) \quad \dots\dots\dots (6)$$

I : リニアアクチュエータに印加する励磁電流

I_0 : 機械的損失を相殺する励磁電流

I_k : 跳躍移動体の速度～励磁電流に関する基本特性から求まる比例定数

K_v : 速度ゲイン

v : 移動体の速度

v_r : 目標速度

とした。

3.2 位置制御 目標軌道からの位置偏差が生じた場合、装置を方向転換し、再度目標軌道に近づくには、脚の蹴出し量を変化させる必要がある。この変化により、装置は進行方向速度に変動を来すと同時に、頭部を左右へふらつかせる。頭部の方向は装置の進行速度ベクトル方向と一致しているので、このふらつきによって、装置は目標軌道に沿っての速度成分に対し、直角方向の速度成分をもつことになる。この直角方向成分を零にするよう制御すれば、装置の頭部を目標軌道に向けることができる。したがって、本装置では、位置偏差と速度偏差(上記の直角方向成分)を同時に考慮しなくてはならず、従来のサーボ系の速度制御、位置制御の構築概念と若干変えざるを得ない。

まず、目標軌道 $y = y_{t0}$ 上(固定カメラで撮影された画像上での座標)を正の方向に移動させる場合を考える。 (x_{t0}, y_{t0}) の位置にあった移動体がサンプリング時間後、目標軌道からずれ、 (x_t, y_t) にあったとする。すると、目標軌道からの位置偏差は、 $d_y = y_t - y_{t0}$ となる。ここで、 $d_y > 0$ ならば、移動体を右旋回させれば位置偏差は減少し、目標軌道に近づく。 $d_y < 0$ ならば、左旋回させれば目標軌道に近づく。

同様に、 (x_t, y_t) における進行方向速度を v とし、その y 軸方向成分を v_y とすれば、 v_y が速度偏差となる。したがって、 $v_y > 0$ ならば、移動体を右旋回させれば速度偏差は減少し、目標軌道に近づく。 $v_y < 0$ ならば、左旋回させれば目標軌道に近づく。

ここで、上記の両事象を同時に加味し、移動体を目標軌道に沿って移動させる制御則として、

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_{10} / (1 + K_{yv1} v_y) (1 + K_{yp1} d_y) \\ I_2 &= I_{20} / (1 + K_{yv2} v_y) (1 + K_{yp2} d_y) \\ I_3 &= I_{30} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

K_{yv} : 速度偏差ゲイン

K_{yp} : 位置偏差ゲイン

I_{10} : 位置偏差を生じる以前にリニアアクチュエータに印加されていた励磁電流

I_i : 位置制御のためリニアアクチュエータに印加する励磁電流

添 字

i : 3 本のリニアアクチュエータを意味する。

が適切であると判断した。

ただし, $K_{yv1}, K_{yv2}, K_{yp1}, K_{yp2}$ は以下の条件より決定される.

$$v_y \leq 0; K_{yv1}=0, K_{yv2}=K_{yv}$$

$$v_y < 0; K_{yv1}=K_{yv}, K_{yv2}=0$$

$$d_y \geq 0; K_{yp1}=0, K_{yp2}=K_{yp}$$

$$d_y < 0; K_{yp1}=K_{yp}, K_{yp2}=0$$

さて次に, 移動体の移動する目標進軌道を x 軸方向から角度 ϕ をもった方向へと変換する場合は, 図4に示したように, 固定カメラで撮影された画像を座標系に対して ϕ だけ回転させる1次変換を実行すればよい. その際, 本位置制御に必要な入力は, 位置偏差および速度偏差のみであるため, 結果として, 以下のように変換した v'_x, d'_y を式(7)の v_x, d_y に代入すればよいことになる.

$$\left. \begin{aligned} v'_x &= v_x \cdot \sin \phi + v_y \cdot \cos \phi \\ d'_y &= x_t \cdot \sin \phi + y_t \cdot \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

参考までに, 図5はこの位置制御のためのフローを示したものである.

3.3 目標位置への移動 設定された目標位置までの最短軌道を計算, それに沿って移動させる. 最短軌道は, 現在位置と目標位置とを結ぶ線上であるので, 頭部を向ける方向角は,

$$\left. \begin{aligned} x_{tr} - x_t \geq 0 \text{ の場合:} \\ \phi = \tan^{-1} \left(\frac{y_{tr} - y_t}{x_{tr} - x_t} \right) \\ x_{tr} - x_t < 0 \text{ の場合:} \\ \phi = \tan^{-1} \left(\frac{y_{tr} - y_t}{x_{tr} - x_t} \right) + \pi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の値を式(8)に代入, 3.2節に従っての制御を行う. この方法では, 移動体はサンプリング時間ごとに更新される目標軌道上に常に存在することになる.

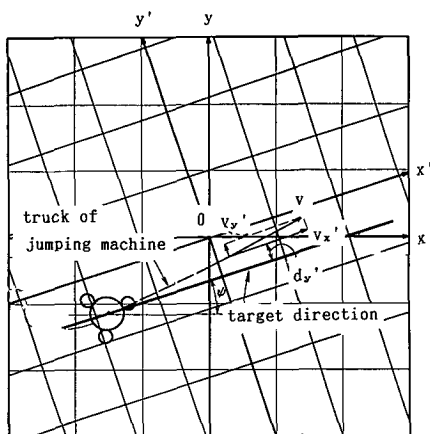


図4 移動体の進行方向角の変換

したがって, 常に $K_{yp}=0$ となる. この場合の制御フローを図6に示した.

4. 実験結果

任意の速度で移動させる速度制御と, 任意に設定された軌道に沿って移動させる位置制御を行う. 撮影全画面の画素数は 129×97 (撮影対象のフィールドは 320×240 mm). 仮定の眼の画素数は, 21×21 (撮影対象のフィールド換算で 50×50 mm) とした. 制御は, 撮影用コンピュータからの $1/20$ 秒ごとの入力を元に行うこととした.

4.1 仮定の眼による移動体の位置および速度の検出 まず, 実験に先立ち, 設定されたサンプリング時間 $1/20$ 秒で, 所望どおり画像が取込めているか, 跳躍時を対象に検討した. 図7はその結果を示したもので, 挙動が十分に検出できていることがわかる. これより, $1/20$ 秒のサンプリング時間でリアルタイム的な

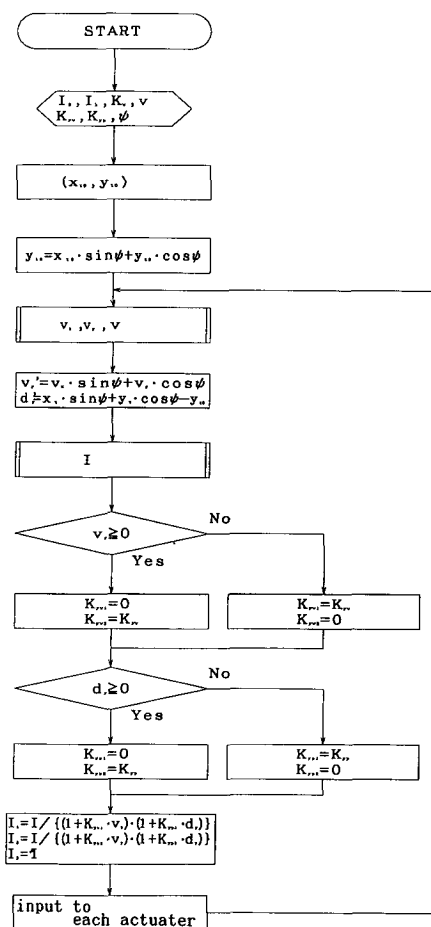


図5 位置制御のフロー

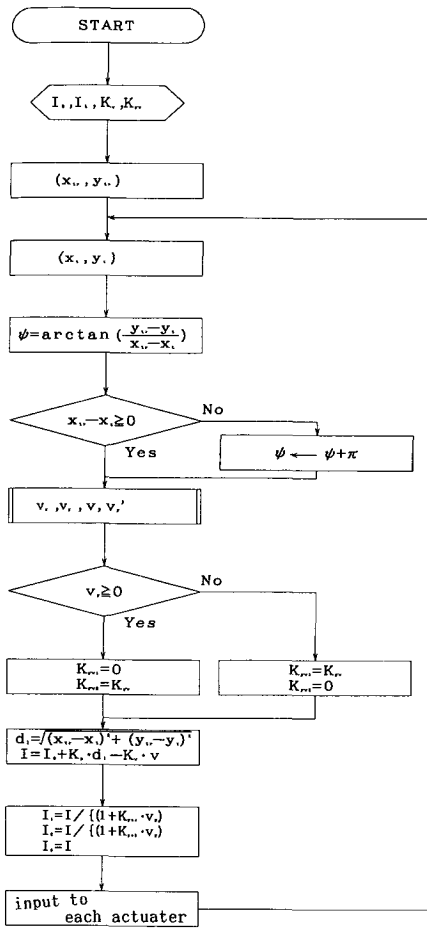


図 6 目標位置への移動制御のフロー

制御が可能であることが確認できた。

次に、仮想の眼が移動体を追従し、移動体の位置、速度を正確に検出できるか検討するため、 x - y プロッタのペン先に標点を付け、 y 軸正方向～ x 軸正方向～ y 軸負方向と順次 30 mm ずつ移動させた。その結果、図 8 に示したように、移動体の位置、速度をほぼ正確に追従できることがわかった。

4.2 跳躍移動体の駆動制御

(a) 直進制御 図 9 は、各ゲインを $K_v=500$ $\text{mA} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 、 $K_{\theta p}=0.05$ mm/mA 、 $K_{\theta v}=6.0$ $\text{mA} \cdot \text{mm}/\text{s}$ 、目標速度を $v_r=50$ mm/s 、目標軌道の方法角を $\psi=0$ として、移動体を駆動した場合の結果を示したものである。図中には、位置制御を行わなかった場合の結果も併記してあるが、3本のリニアアクチュエータの制御則が妥当なものであることがうかがえる。

(b) 目標軌道への追従 図 10 は、目標軌道を

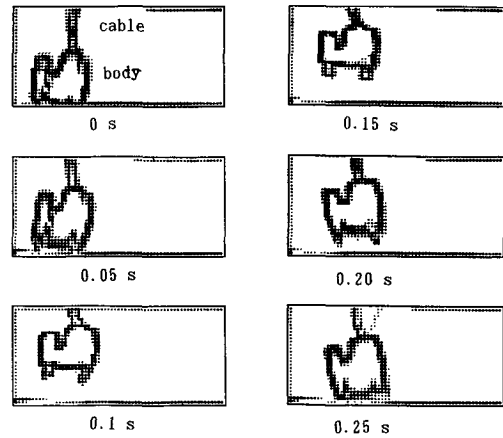


図 7 跳躍時の画像例

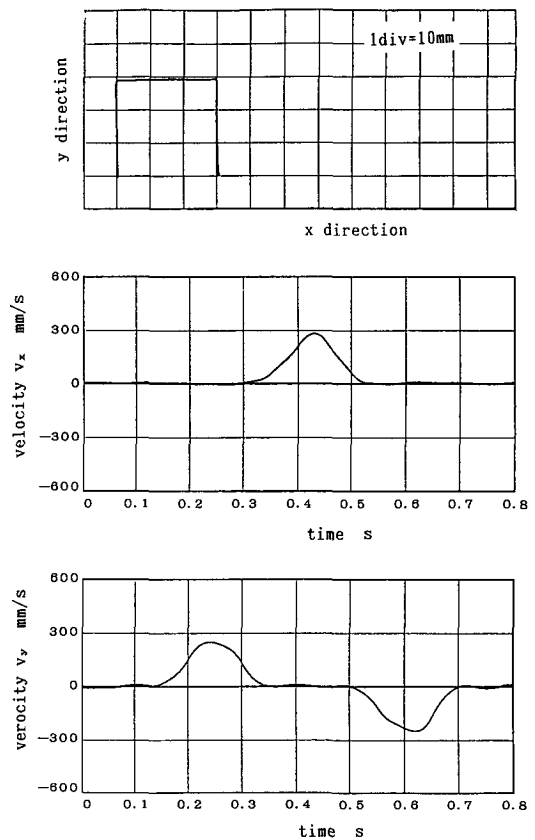


図 8 仮想の眼による移動体の追従

x 軸より 30° 傾いた方向とし、移動体を任意の位置に、しかも姿勢角を任意にして設置、設定速度 $v_r=50$ mm/s とした場合、目標軌道を追従できるか検討した結果を示したものである。姿勢角を変えながら目標軌

道に近づいていくようすがわかる。

また図11は、ゲイン K_{yp} , K_{yv} を変化させた場合、目標軌道へ近づく状況の違いを示したものである(目標速度: $v_r=50$ mm/s)。ちなみに、 $d_y > 0$ の領域での挙動を見てみるに、 K_{yp} の値が大きければ大きいほど方向転換が急であり、目標軌道に対してオーバーシュア

ト気味となる場合も生じる。また目標軌道へ向かっていく途上の微小なふらつきは装置の頭部を目標軌道へ向ける制御〔式(7)中の K_{yv} による〕の影響である。 K_{yv} が大きくなるとふらつきは大きくなるが、図中に示した程度の数値であればふらつきを少なくして制御できることがわかる。

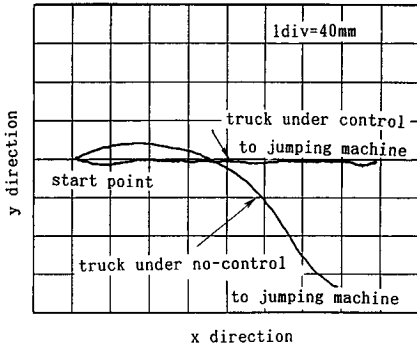


図 9 跳躍移動体の直進制御

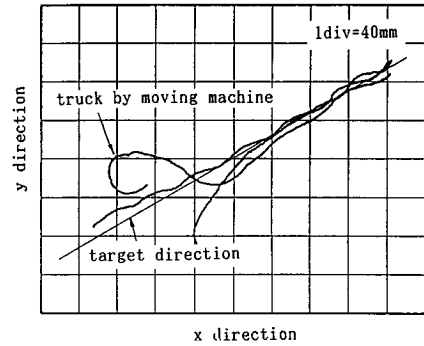


図 10 跳躍移動体の目標軌道への追従制御

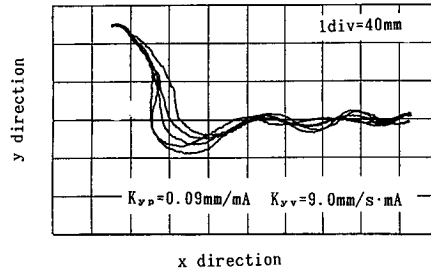
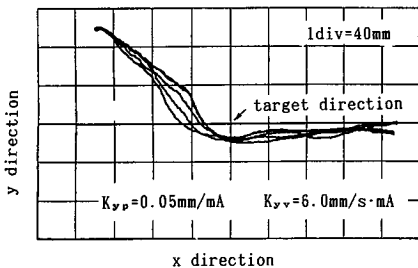
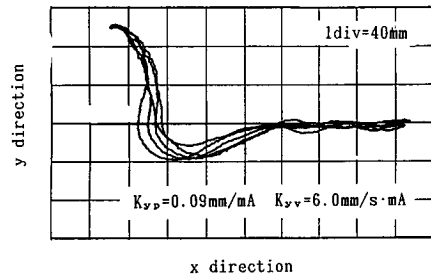
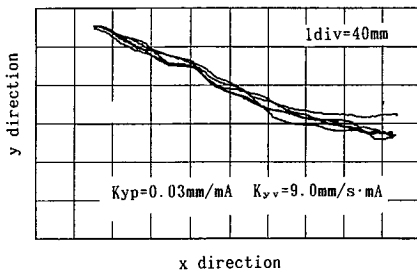
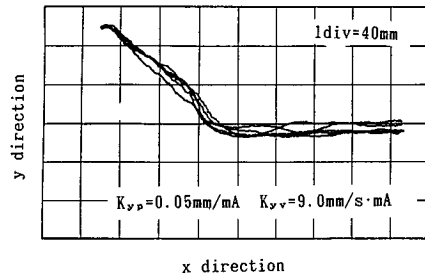
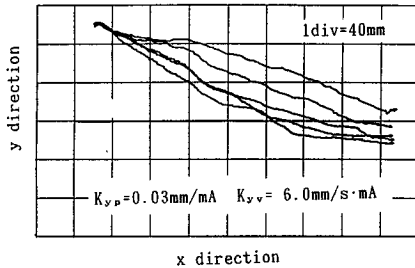


図 11 ゲインの値による目標軌道追従の変化状況

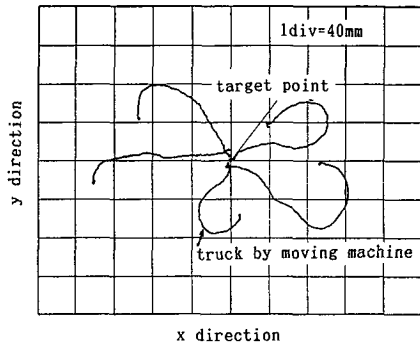


図 12 移動体の目標位置へ追従制御

(c) 目標位置への移動 図 12 は、目標位置を $(0, 0)$ とし、移動体の初期設定位置、姿勢角を任意にした場合について、移動体が目標位置へ接近していく状況を示したものである。ただし、この場合、各ゲイン

は $K_p = 300 \text{ mA/mm}$, $K_v = 300 \text{ mA} \cdot \text{s/mm}$, $K_{vp} = 0.05 \text{ mm/mA}$, $K_{vv} = 7.0 \text{ mm/s} \cdot \text{mA}$, としている。この結果、移動体の姿勢がどのようなであっても、ほぼ正確に目標位置へたどり着くことがわかる。

5. ま と め

跳躍移動体は、床面の状況や、電力供給ケーブル等の影響で、位置や速度が目標から外れやすいため、閉ループ制御を必要とする。本報では、CCD カメラによる画像を処理し、簡単な制御則で駆動する方式を提案した。その結果、決められた速度を維持しながらの目標軌道への接近、目標位置への到達等、ほぼ所期どおりの結果が得られた。

文 献

- (1) 山本・大滝・石川, 機論, 57-538, C (1991), 1854.
- (2) 山本・大滝・石川・綿貫, 機論, 58-551, C (1992), 2096.