リニアスキャンカメラ（一次元高速度ビデオカメラ）の開発*

横 山 直 樹** 植 村 恒 義***

Development of One-dimensional High-Speed Video Camera

Naoki YOKOYAMA and Tsuneyoshi UYEMURA

This paper describes development of versatile one-dimensional high-speed video recording camera. It consists of linear-image sensor, frame memory and personal computer. This camera can digitize and store line-image of object at the given period, and resulting images, i. e. time-displacement characteristics of object, can be observed and analyzed through frame-memory. Maximum sampling clock is 2.048 MHz, and one-line image consists of 512 digitized intensity, so minimum period between line-scannings is 250 μ s. This is equivalent to 4 000 samples/s and comparable to that of traditional high speed camera. Various image-analysis can be performed with personal computer. Experiments were performed to test this video-recording camera. The objects were free-fall of a steel ball and movement of shutter blades in 35 mm still camera. And characteristics of this system were discussed.

Key words: high-speed video system, linear-image sensor, image analysis, digital signal processing

1. 緒 言

高速度ビデオカメラとは、そのフレームあるいはフィールドのサンプリング間隔が、NTSC規格による一般的なビデオ記録のサンプリング間隔（毎秒60フィールド/30フレーム）より短い記録系と定義できる。そうした高速度ビデオカメラが利用可能となれば、従来の銀塩感光材料を大量に使用する高速度カメラに替わって、種々の応用分野で利用されるようになると思われる。

高速度ビデオカメラが備え得る特徴を重要なものから列举すると、

長 所

①銀塩感光材料を使用せず、現像処理を必要としない。

- ・記録後直ちに結果を再生できる。
- ・より現場向きである（ラボ設備不要）。

②電気・磁氣的記録媒体を使用する。

- ・現象とカメラとの同期が容易に、柔軟に行える。
- ・記録媒体を再使用できるのでランニングコストを軽減できる。
- ・計算機による解析処理に移行しやすい形でデータが得られる。

短 所

①現在の技術的レベルでは、時間分解能と空間分解能で従来型の高速度カメラに劣る。

等とまとめられる。

現在までに実用化され、市販されている高速度ビデオシステムは、NAC社 HSV-400（カラー、400フィールド/s）、Eastman Kodak社 SP-2000（白黒、2 000～12 000フレーム/s）等が代表的なものである。前者は、一般的なVHS方式のVCRにおいて、そのテープ速度を3.3倍に高めることで、NTSC方式の3.3倍の記録速度を達成しているものであり、いわばVCR改良型と分類できる。後者のタイプは、並列に読出しのできるアレイイメージセンサをまず開発し、NTSCフォーマットには準拠しない全く異なる独自のシステムを実現したものである。

こうした電気・磁氣的記録形態をとるシステムに共

* 原稿受付 昭和63年7月27日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月27日）および昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和63年3月16日）にて発表

** 正 会 員 東海大学開発技術研究所（平塚市北金目1117）

*** 名誉会員 東海大学開発技術研究所

Fig. 1 Schematic diagram of linear-scan camera

通する問題点は、単位時間あたりに記録できる情報量が、システムの各部分の帯域の制限を受け、時間分解能と空間分解能との間にトレードオフが発生することである。したがって、どちらかの分解能を優先せざるを得ない。ただし、従来型のオプトメカニカルなカメラが常に行っているように、なんらかの形での並列記録を併用することにより、この帯域の制限はある程度緩和される。EK社 SP-2000 では、この並列記録を行っており、時間分解能は従来型の回転プリズム式高速度カメラ程度であるが、空間分解能が十分であるとはいえない¹⁾。一般的には、記録の並列化あるいは記録する情報の圧縮により、限られたシステムの記録帯域を生かすことが必要となる。

本論文で提起するカメラは、並列化により時間分解能および空間分解能を高めるのではなく、二次元画像から一次元画像への情報圧縮により、時間分解能を高めるものである。単位時間あたりに得られる対象物体の時間-変位データ数を増加させ、高速度ビデオカメラとして利用するアプローチを採るものである。しかし一次元高速度カメラであるために、記録対象が制限されることが考えられるのでシステム全体の有効性を実験的に検討した。

2. システム構成

システム構成図を図1に示す。光学系としては、35 mm一眼レフカメラ用のレンズを使用し、またセンサで切りとる一次元視野をファインダから確認できるように、半透鏡とアイピースを用いている。ラインイメージセンサとしては、MOS型のMN 512を使用している。サンプリングの同時性という意味からはCCD型のセンサを用いる方がよいが、光蓄積時間を制限しないと像が流れることになり、露光時間を短くする必要性からMOS型を用いている。ただし記録画素の位置により、時刻を補正することが必要である。このラインセンサの駆動回路(BS-812)は、メーカが評価用に供給しているものである。

Fig. 2 Schematic of control logic

システム全体のタイミングを制御する回路はTTLを用いたランダムロジックを自作した。この制御回路のブロック図を図2に示す。この制御回路は、外部トリガ信号により動作が開始され、まずフレームメモリに対し H. sync および V. sync を、最初のマスタクロックの立上がりで発生させ、1ラインのサンプリング開始および1フレームの開始を知らせる。同時にセンサ駆動回路に対しては、ラインスキャンの開始信号(s. p.)をアクティブにする。センサ駆動回路へのサンプリングクロックとフレームメモリへのクロックは同一のものである。フレームメモリ(pip-4000)側には、スロースキャンユニットが併用されており、遅いレートの疑似NTSC信号(ただし水平および垂直同期信号および輝度信号は独立)による光強度の時空間分布を960ライン(2フレーム)まで記録できる。

このシステムは、高速度カメラとしての応用を前提としているので、同期の点には注意することが必要である。マスタクロックとして8.192 MHzを用いているので、トリガ信号と最初の H. Sync および V. Sync

Fig. 3 Flow chart

Table 1 Temporal resolution of linear-scan camera

	Sampling clock kHz	Line-scan interval	Time to store one full-frame	Equivalent sampling rate sps
2	10.2	50 ms	24.0 s	20
3	51.2	10 ms	4.8 s	100
4	102.4	5 ms	2.4 s	200
5	512.0	1 ms	480 ms	1 000
6	1 024.0	500 μ s	240 ms	2 000
7	2 048.0	250 μ s	120 ms	4 000

の同期ずれは、ワーストケースで、 $1/8.192 \text{ MHz} = 120 \text{ ns}$ となっている。システムのサンプリングクロックはサミールスイッチにより手動で切り替えることができる。このスイッチの位置に3 bitの出力ポート等をおくことにより、計算機からサンプリングクロックを、1 スキャンごとに切り替えることも可能である。またフレームメモリー側のバッファメモリー（ 512×480 ）は2画面分あり、記録の終了したフレームの内容を常にモニタ上に表示することができる。さらにこの信号をVCRにより記録することでアナログ記録とはなるが、ビデオテープの許す限り長時間記録もできる。

次にホスト計算機上のソフトウェアであるが、本カメラでは記録段階での基本的な制御はハードウェアで行っており、解析段階でのみソフトウェアを利用する。時間-変位自動解析モードにおける解析プログラムの流れ図を図3に示す。1画面（480ライン）の解析は数秒で終了する。平滑化および物体の位置判定の方法については3.2項で述べる。表1には、このカメラの時間分解能特性を示す。ここで、左端の数字は前述のサミールスイッチのクロック番号であり、2～7までを使用している。光強度の512個のサンプルが1ラインを構成し、480ラインが1フレームを構成するので各サンプリングクロックにおける1フレーム記録

Table 2 Characteristics of various high-speed camera system

System	Spatial resolution (lines)	Temporal resolution sps	Overall resolution
Linear-scan camera	200	4 000	800 000
Frame-memory	200	30	6 000
HSV-200	100	200	20 000
SP-2000	65	2 000	130 000
1 PL	700	200	140 000
16 HM	600	4 000	2 400 000

時間は24.0 sから120 msまでとなる。またラインのサンプリングレートとしては、毎秒20サンプルから4 000サンプルまでとなっている。

3. 特性評価および応用実験

3.1 空間分解能の評価

標準TVテストチャート（EIAJ TEST CHART A）を用いて、本システムの空間分解能の評価を行った。他のシステムあるいは従来型の高速度カメラに対する結果とともに表2に示す。さらにこの空間分解能の実測値をもとに、これに時間分解能をかけることで総合分解能をもあわせて評価した。二次元画像を記録するフレーミングカメラについては、直接本論文で提起するリニアスキャンカメラと比較できないので、データが一次元に縮退した場合を想定している（つまり物体が画面上で一次元運動をした場合等）。本システムでは、空間分解能は走査速度（サンプリングクロック）によらず一定であり、約200本である。また総合分解能（時間分解能と空間分解能の積）は 8×10^5 となった。EK社SP-2000の空間分解能のみは、推定値である。表2において本システムの総合分解能は、従来型の回転プリズム式高速度カメラ（Hitachi 16 HM）に比べると1/3程度であるが、その他のビデオシステムおよび間欠かきおろしカメラ（1 PL）を上回るものである。ただし物体が一次元運動をしており、変位が一成分のみで表現される場合に、単位時間あたりに得られる情報量が総合分解能の定義である。

3.2 鋼球の自由落下の記録・解析

直径30 mmの鋼球を白色に塗装し、図1の配置により、その自由落下の軌跡を記録した。サンプリングクロックは、512 kHz、1.024 MHz、2.048 MHzとした。最終的にモニタ上で観察された記録結果（時間-変位特性）を図4に示す。ここで横軸は、物体の変位を、縦軸は経過時間を示している。対象が自由落下であるために、結果として得られた時間-変位曲線は放物線となり、サンプリングクロックの相違により縦軸

Fig. 4 Arranged images for free-fall of steel ball

のスケールが変化している。こうして得られた記録結果は、そのままフレームメモリーに置かれており、観察者が定性的に判定するだけでなく、計算機からアクセスすることができる。時間-変位の自動解析においては、まず図5(a)に例として示されるような、1ラインのプロファイル(光強度分布)から、物体の端点を検出するために、数値微分処理を行う。ただし、図に見られるように、このプロファイルには、512個の各イメージセンサ素子の感度のばらつき、あるいはMOS型イメージセンサ特有のスイッチングノイズが含まれているので、2次多項式適合による平滑化微分を行う²⁾。つまり移動平均の重み係数として、 $-5, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, 5$ を用いるのである。こうして得られたものが、例えば図5(b)である。この図より物体の位置を判定し、次のスキャンラインを処理していく。こうして有効なすべてのラインを処理し、物体の時間-変位データを得る。その一例を図6

(a) Intensity distribution

(b) Intensity changes

Fig. 5

(a) Trajectory of steel ball

(b) Time-velocity characteristic
Fig. 6

(a)に示す。これは、サンプリングクロックが1.024 MHzの場合である。このデータには、時空間領域での量子化誤差の両者が含まれており、そのまま数値微分して時間-速度、あるいはさらに時間-加速度特性を

精度良く求めることは困難である³⁾。ここで時刻 i で得られた変位データ D_{di} には、空間的な量子化誤差が含まれているので、

$$D_{ri} = D_{di} \pm \frac{L}{2N} \quad (1)$$

の関係がある。ただしここで D_{ri} は時刻 i における物体変位の真値、 L は一次元視野の実寸、 N は空間的量子化の分解能（センサの素子数）である。空間的分解能 $S_r = L/N$ とおくと、 D_{di} を数値微分して得られる時刻 i から $i + \Delta t$ 間の平均速度 V_{di} は、

$$\begin{aligned} V_{di} &= \frac{D_{di+\Delta t} - D_{di}}{\Delta t} \\ &= \frac{D_{ri+\Delta t} - D_{ri}}{\Delta t} \pm S_r / \Delta t \\ &= V_{ri} \pm S_r / \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで V_{ri} は平均速度の真値である。いま式 (2) において右辺第 2 項が誤差を与えるのであるが、 S_r が一定であれば Δt に逆比例してこれが減少することになる。つまり測定区間を広くとり、 Δt を大きくして速度を推定すれば、その誤差が小さくなることがわかる。ただし Δt を大きくとるということは、平均速度の測定区間が広がることを意味するから、瞬間速度の推定を行うという本来の目的からは、はずれることになる。また速度の誤差率 V_{err} は、式 (2) より、

$$V_{err} = \frac{S_r}{V_{ri} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

となる。本実験の場合物体は自由落下運動をしており、 $V_{ri} = gt$ (g は重力加速度 9.8 m/s^2) であるから V_{err} は

$$V_{err} = \frac{S_r}{g \cdot t \cdot \Delta t} \quad (4)$$

となる。 S_r 、 Δt に具体的な数値を与えて、 $V_{err} = 0.26/t$ なる関係が得られる。したがって量子化された物体変位を数値微分することによって得られる物体速度の誤差率は $t \geq 0.26 \text{ s}$ の領域で 1 以下となる。これは Δt 間の物体の変位増分が、空間分解能 S_r に等しくなる時間領域と同一である。つまり時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ 間の変位の増分は、

$$g \cdot t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} g \cdot (\Delta t)^2$$

となり、これが S_r と等しくなるとし、 t について解くと、

$$t = \frac{S_r}{g \cdot \Delta t} - \frac{1}{2} \Delta t \quad (5)$$

となり、右辺第 2 項を無視すると、 $V_{err} = 1$ の場合の式 (4) と同一となる。なんらかの平滑化を行わない場

Fig. 7 Calculated G-constant vs. time

Fig. 8 Experimental optical arrangement

合の速度の計測誤差は、上式で $S_r = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 $\Delta t = 500 \times 10^{-6} \text{ s}$ であるから、 $\pm 2.6 \text{ m/s}$ 程が見込まれる。前述の平滑化微分を時間軸に対して用いることにより時間-速度特性を求めたのが、図 6 (b) である。この処理は、式 (2) において Δt を 10 倍にする効果があり、物体変位の計測誤差が位置の量子化誤差だけによるならば、速度の計測誤差は $\pm 0.2 \text{ m/s}$ 程のはずであるが、空間分解能の測定値が 200 本でもあり、誤差は大きめの値となっている。しかし、物体変位が大きくなるほど、つまり時間が経過するほど変位に対する量子化誤差率が緩和されるので、得られた変位と時刻から加速度を評価すると図 7 のような変化となり、加速度が一定値 $g = 10.64 \text{ m/s}^2$ に漸近するのがわかる。ここでの重力加速度 g に関する 8.5% 程の系統誤差は、観測上の時刻 0 の真値からの誤差によるものと考えられる。

3.3 フォーカルプレーンシャッター幕の動作解析

次に、一次元的な高速度運動を行う物体の代表例として、35 mm 一眼レフカメラのフォーカルプレーンシャッター幕を選び、その動作の記録及び解析を行った。実験配置図を図 8 に示す。使用した被測定カメラ（ニコン製 F-1）の最高シャッター速度が $1/2000 \text{ s}$ であったので、 $1/15 \text{ s}$ から $1/2000 \text{ s}$ のシャッター動作を対象として実験を行った。記録結果の例を図 9 に示す。この実験結果においても、横軸が変位（空間座標）、縦軸が時刻（時間座標）を示しており、定性的

Fig. 9 Arranged images for movements of shutter-blades

Fig. 10 Two-way analysis methods

には、 $1/60\text{ s}$ 以下のシャッタ速度ではシャッタに全開状態が存在すること、シャッタ幕それぞれ（先幕および後幕）は、動作速度によらず同じような時間-変位曲線を示すことなどが理解される。

これらの撮影結果を、計算機により数値的に解析する場合には、先の3.2項で述べたような時間-変位特性を求めることだけでなく、図10に示される解析概念図によって表現されるように、「観測位置を固定した場合の光強度の時間変化I」および「時刻を固定した場合の先幕と後幕の位置（あるいは距離II）」が、それぞれ垂直方向（時間座標）および水平方向（空間

Fig. 11 Intensity variation at the center of shutter ($1/125\text{ s}$)

Fig. 12 Time-displacement of both blades ($1/15\text{ s}$)

Fig. 13 Time-displacement of both blades ($1/2000\text{ s}$)

座標)の1ラインの解析によって得られるので、さらにそれぞれに直交する方向に変化を追跡することにより、比較的簡便にシャッタ動作に関連するパラメータを求めることができる。この特徴は本システムが二次元画像情報を一次元情報に圧縮した上で記録していることから派生するものであり、同様な解析を、時系列として得られた複数の二次元画像の記録に対して行う場合には煩雑な手順が必要となろう。

実際にシャッタ中央部での光強度の時間変化を求めた結果を図11に示す。この場合の動作時間は $1/125\text{ s}$ であり、光強度変化の半値幅が 8 ms であるから、シャッタ速度は正しいことがわかる。直交する解析の例を図12, 13に示す。これらはそれぞれ $1/15\text{ s}$ 、 $1/2000\text{ s}$ の場合の、時間に対する先幕および後幕の位

Fig. 14 Time-velocity (1/15 s)

置の変化である。1/2 000 s の場合には、本システムの時間分解能 ($250 \mu\text{s}$) が、現象の速度 (1/2 000 s = $500 \mu\text{s}$) に対して不足しているわけである。本システムが有効である対象は 1/500 s (2 ms) までのシャッタ動作と考えられる。さらに時間-速度の解析例を図 14 に示す。これは、図 12 を平滑化微分することで得られたものである。

4. 結 論

本論文では、二次元画像情報を一次元光強度分布に

圧縮し、高速度記録を行うリニアスキャンカメラシステムを提起し、その空間分解能および時間分解能の評価を行い、従来型およびフレーミングカメラをも含めた各種の高速度カメラシステム内での位置づけを行った。さらに鋼球の自由落下の記録・解析を行い本システムの基本的動作原理および特性について議論した。また一次元高速運動物体の例として 35 mm カメラのフォーカルプレーンシャッター幕の動作解析、およびシャッター特性の評価を行い、本システムにより柔軟な解析が行えることを示した。

参 考 文 献

- 1) T. H. Lee et al.: 2 000 fps Solid-state Image Sensor, SPIE, Vol. 348, High Speed Photography, San Diego, (1982) 894.
- 2) 南 茂夫: 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社 (1986) 90.
- 3) 楊 傑, 横山直樹, 植村恒義: 高速度撮影の解析精度に対する諸要素の影響——画像計測の動的精度に関する研究 (第3報), 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1987) 543.

編集後記

まだまだ寒い日が続きますが、いかがお過ごしでしょうか？ 今月はマン・マシンシステムと題し、従来から大きな問題であると指摘されながら、決定的な解・手法が出ていない分野を扱ってみました。

最近の航空機事故、鉄道事故などを見ても、人間をサポートするシステムが完全であると思われていても、それを使う肝心の人間が何をするか分からないために、システムに落とし穴があったというケースが多くあるようです。このことは、人間がシステムにかかわってくることの難しさを端的に示しているのではないのでしょうか？

人工知能の分野でおそらく解けないであろうと信じられている問題に、フレーム問題というのがあります。これは、どんなに対象に関する知識を書いたとしても、それには抜けているところがあり、これだけあれば完全であるという知識量は予測できないという難問です。いかに科学技術が進歩しても、人間が何をするかを完全に予測できないというのは、このフレーム問題と一脈通じるところがあるようです。

工業のソフト化など、これから人間の要素が精密工学においても人間の占める重要性はますます大きくなると思いますが、その一方で人間のすることが、結局予想できないかも知れないというのは我々に重要な示唆を与えているような気がします。マン・マシンシステムへの関心が高まることを期待します

(富山哲男)