イメージセンサを用いた固体粒子の粒径 および移動速度の同時測定*

上 和 野 満 雄** 坂 元 克 之***
古 閑 俊 通*** 青 木 隆 一**

Simultaneous Determination of Diameters and Velocity of Moving Solid Particles with Image Sensor

by

Mitsuo KAMIWANO, Katsuyuki SAKAMOTO,
Toshimichi KOGA and Ryuichi AOKI
(Yokohama National University, Yokohama)

An attempt has been made to employ a linear photo-diode array (so-called an image sensor), such as the one used as the image pick up element in picture analysis or facsimile telegraphy, for simultaneous determination of the diameter and velocity of moving solid particles.

An optical microscope was used in this study. Transparent glass spheres having 120~310 micron diameter were placed in rows on the movable stage of the microscope, which was moved at a constants speed. The images of moving glass spheres were detected with an image sensor attached on the top of microscope. After A-D conversion of the output signals of the sensor, they were fed into a miniature computer, where each particle diameter and velocity were calculated.

The results showed the possibility of making general use of image sensors for accurate measurements of the size and velocity of solid particles in motion.

(Received Dec. 19, 1977)

キー・ワード：光学的測定法，イメージセンサ，ホトダイオードアレイ，粒径測定，粒子移動速度測定

1 緒 言

流動層，ホッパー等種々の粒体を扱う装置の特性を把握するためには，あらかじめ取り扱う粒体の粒径およびその装置内の粒体の流動挙動を明確にしておくことが望まれる。粒子径の直接的測定法については静止状態の粒子の像をブラウン管に拡大し，それを読み取る方法¹⁾²⁾，ファイバースコープを用いた光学的方法等の報告がなされている。この場合，前者のものについては移動速度に及んだ測定はなされていない。一方，後者のものについては粒子径およびその移動速度は測定が可能であるが，流動場にファイバースコープを直接挿入する方法であるために，流動を乱す欠点があるものと思われる。この種の測定では，粒体の粒径と同時にその移動速度の両者を無接触で，しかも迅速に多量のデータ処理が可能な方法の確立が望まれる。

最近，情報伝達に伴う画像解析には，ビデオ出力信

号として得られる一次元ホトダイオードアレイ（ここではイメージセンサと称する）が，盛んに用いられている。上和野らは，化学的な移動現象の測定法にイメージセンサを用いており，ここではさらに，この方法を移動している粒体の測定に応用した。この測定法を検討するにあたっては，測定上生ずるさまざまな測定誤差がどのような因子であり，かつどの程度のものであるかを明確にすることが必要と思われる。ここでは本測定方法を説明するとともに，測定誤差を検討した結果をまとめて報告する。

2 光検出部およびその回路

本研究で光検出部として用いたイメージセンサは，Reticon RL128 G⁵⁾であり，その駆動回路は Reticon RC 104/100 A である。Fig. 1にイメージセンサの寸法仕様を示した。これは，1bit，15 μ m $\times$ 26 μ m のホトダイオードが128個直線状に配置されたもので，全長は3.2mmである。また，駆動回路にはイメージセンサに印加するクロック波形の電圧発生回路，遅延回路，

* 原稿受理 昭和52年12月19日

** 正 会 員 横浜国立大学工学部 横浜市内南区大岡

*** 横浜国立大学工学部 横浜市内南区大岡

Fig. 1. Package outline of image sensor.

信号の増幅回路, タイミング回路等が組込まれている。これによりイメージセンサの各ホトダイオードに光が照射されると光の強さに対応したビデオ出力信号が得られる。この出力信号はつなぎ目のないアナログ出力信号として得られ, その最高電圧値は5Vである。またイメージセンサの各ホトダイオードは駆動回路によって自己走査されており, 1 bit あたりの走査速度は2 kHz~2 MHz の範囲内で変換することができる。同センサの S/N 比は 40dB であり, 低ノイズのものである。

3 測定装置および操作方法

Fig. 2 に測定装置の概略を示した。装置は光源部分, 粒子を一定速度で移動するステージ, 顕微鏡の鏡筒部分とイメージセンサの受光部分より構成されている。光源とレンズ系により平行光線を作成し, この光線の赤外線部分を除くために分光フィルターを取り付けた。粒度分布をもつ粒子が一行に並んでいる定速移動ステージの下方よりこの光線を照射する。光透過法と同様な原理により, この際生ずる光の明暗を顕微鏡を通して拡大し, イメージセンサで受光する仕様のものである。Fig. 3 には測定方法の原理と粒子径測定時における駆動回路の出力信号の波形の状況を示した。発光側の平行光線がイメージセンサの光検出部全体に均等の強さで照射されるときは, 128bit のホトダイ

Fig. 2. Schematic diagram of optical system.

Fig. 3. Principle of measurement method and video output signal of drive circuit.

オードすべてがほぼ一定の出力電圧値を示す。なお, この場合, おおのこの出力信号の不揃いは, $\pm 8\%$ 程度, 例えば, 出力5Vに対して $\pm 40\text{mV}$ の変動を示しているが, 粒子の光像の明暗による変動値, 約3Vに比してかなり小さい。この不揃いの信号と出力信号の比をとると $0.08\text{V}/3\text{V}$, すなわち $1/38$ となる。したがって, 本法で粒子径を決める場合の出力信号の選択レベル (トリガーレベル) は, これを考慮して決定した (Fig. 3 (a)参照)。つぎに, 粒子により光が遮断されると, 影像の大きさに対応して出力電圧値は低くなる (Fig. 3 (b)参照)。Fig. 3 (a)は出力信号のブラウン管写真を示したものであり, Lの部分の幅を読み取るにより粒径を求めた。

$$D'_{pm} = 3.2 \times \frac{L}{m} \times \frac{1}{S} \quad (1)$$

ここで同式右辺の 3.2mm はイメージセンサ1スキャン分の実幅, L はトリガーレベルを切った処の出力信号の幅 (Fig. 3 (a)参照), m はイメージセンサの出力信号の幅に相当, S は像を拡大した面積の平方根をとった拡大率を示す。

Fig. 4 は信号処理系統をブロックダイアグラムで示したものである。イメージセンサからの信号は, 駆動回路によりアナログ電圧に変えられ, レベル変換器および増幅回路を経てAD変換した後, ミニコンの磁気テープに収め, ミニコンのCPU (日本ミニコンNOVA, MODELO 1) または計算機 (HITAC, 8250 型) にて粒子径 D'_{pm} と後述する移動速度 U'_p の両者を演算処理

Fig. 4. Block diagram of signal handling system.

する。なお、ビデオ出力信号波形の観察はブラウン管で行った。

測定に用いた粒子は透明ガラス球であり、粒径は読取顕微鏡で310, 250, 220, 160, 120 μm を示すものを選び出し、これを測定に用いた。Fig.1 に示した移動ステージはシンクロナスマーターを用い、ギヤによって $U_p=1.6, 3.0, 5.0$ mm/sec の速度（おのの一定速度）とした。また顕微鏡倍率は接眼レンズ7倍、対物レンズ40倍を用いた。イメージセンサの周波数はミニコンのサンプリング間隔が最高79.7 μsec であるので、12.5 kHz/bit とした。この場合、128 bit の全走査に要する時間（以後、走査周期と称する）は10.8 msec となる。

4 結果および考察

4・1 粒径測定

Table I には読取顕微鏡によって求めた真の粒径 D_p と各移動速度における測定された粒径 D_p^* の両者を示した。同表によると真の粒径 D_p に比べて、粒子移動速度が大きくなり粒径が小さくなる程測定値 D_p^* は、誤差が大きくなることがわかる。ここで粒径誤差の原因を考察すると次の事が考えられる。まず基本的には光源、光学系の不充分性による誤差、とくに平行光線の良否およびイメージセンサ全 bit に均等な強さの光を照射した場合のビデオ出力信号の不揃いがあるが、前者は良質な光学系を用いることにより、後者は前述のとおり粒径を決定する際のトリガレベルの適宜な選択により対処した。さらに以下、次の二つの項目

- イメージセンサの測定分解能に起因する誤差
- 測定対象粒子が視野内を通過する間（イメージセンサのダイオード列を横切る間）に走査する走

*1 これは測定されたいくつかの粒子径 D_{pm} の中で最も大きい粒径を示すものであり、Fig.5 で後述のように粒径測定による誤差が最も少く真の粒径 D_p に対応する値を示すものである。

Table I. Measured value of particle diameter.

D_p (μm)	Measured diameter D_p^* (μm)		
	U_p^* 1.6(mm/sec)	3.0(mm/sec)	5.0(mm/sec)
310	300	316	278
250	243	232	229
220	210	204	206
160	174	145	144
120	131	107	—

(Scan period of image sensor: 12.5 kHz)

* : Real value of moving velocity

査回数の大小による誤差

につき検討した。まず(a)についての分解能に起因する誤差 l は次式によって求めた。

$$l = \frac{l_b \times 2}{S} \quad (2)$$

ここで l_b は 1bit の大きさ、 S は像の拡大倍率を示す。すなわち平行光線中を粒子が通過するとき、粒子の両端部に対応するフォトダイオード 1bit $\times 2$ が考慮される最大の誤差となり、これは $25\mu\text{m} \times 2 = 50\mu\text{m}$ である。これを実際の像の長さあたりの拡大された倍率8.77で割った値 $5.75\mu\text{m}$ が分解能に起因する誤差 l と考えられる。

つぎに項目(b)の走査回数に起因する誤差 l' は次式によって求めた。

$$l' = 24y \quad (3)$$

ここで $4y$ は Fig.5 に示した値である。Fig.5 は測定の際の状況を模式的に示したものである。図において、実際には粒子が紙面上右方向に移動し、イメージセンサの走査は右端の位置で固定されているが、便宜上、粒子が静止して走査が左方向に移動している状況として表してみた。ここで粒子の最大粒径を示す値は d であるが、これよりも $4x$ 離れて走査が行われると $4y$ の誤差が生じ、この誤差は粒子の上部と下部の両

Fig. 5. Relation between scan period and measurement error.

Fig. 6. Error of measured value of particle diameter.

Fig. 7. Resolving power of measurement.

方で起るため、結局、走査回数による誤差は $24y$ になる。

Fig. 6 は測定粒径値の誤差を各粒径に対する百分率で示した値をプロットで、項目(a), (b)により求めた計算による誤差を各粒径に対する百分率で示した値を曲線で表したものである。測定誤差と計算による誤差の傾向は同様であるが、その数値は数%の差が生じている。この原因を考察したものが Fig. 7 である。Fig. 7 は金属薄膜を蒸着したガラスプレートを一定幅の直線状に削って透明とし、その部分の透過光の状況を測定、撮影したものである。Fig. 7 にはこのときのブラウン管写真も合わせて示した。これによるとイメージセンサの分解能は $28\mu\text{m}$ 程である。したがって計算の誤差との間には実際に約 5 倍の相違があることが判り、これが数%の差の原因と考えられる。

4.2 粒子の移動速度

粒子移動速度 U'_p は次のようにして求められる。まずイメージセンサの走査周期 N_f が一定であるため、測定により求められた粒径値 D_p' とその粒径の測定時に走査された走査回数 N の関係から次式によって求めることができる。

Table II. Measured value of moving velocity of particles.

D_p (μm)	Moving velocity U_p' (mm/sec)		
	U_p^{*2} 1.6(mm/sec)	3.0(mm/sec)	5.0(mm/sec)
310	1.55	3.07	4.63
250	1.54	2.79	4.52
220	1.50	2.77	4.72
160	1.69	2.77	4.52
120	1.73	2.75	—

(Scan period of image sensor: 12.5 kHz)

U_p' : Measured value of moving velocity

$*2$: Real value of moving velocity

$$U'_p = \frac{D'_p \cdot N_f}{N - 1} \quad (4)$$

Table II に移動速度の測定結果の一例を示した。Table II によるステージの移動速度が大きく粒径が小さい程誤差が大きくなっていることがわかる。この場合、粒径測定を行った後、粒子の移動速度を(4)式により求めるので、粒径および移動速度の両者の測定誤差が加味されることになる。したがって計算による誤差は、(2), (3)式の l , l' および次式に示す粒子移動速度の測定時に起る誤差の l'' の三者の和になる。

$$l'' = \Delta x_1 + \Delta x_2 = 4\Delta x \quad (5)$$

ここで、 Δx , Δx_1 , Δx_2 は Fig. 5 参照。

以上のことから計算による移動速度誤差を求めてみると例えば、 $U_p = 1.6 \text{ mm/sec}$, $D_p = 310 \mu\text{m}$ では 13.3% であるが、 $U_p = 5.0 \text{ mm/sec}$, $D_p = 220 \mu\text{m}$, $160 \mu\text{m}$, $120 \mu\text{m}$ のおのおのでは 50% を越えてしまう。これはイメージセンサの走査周波数を高めて、走査周期を短くすることによって誤差を小さくすることができる。なお、この事は粒径測定の場合も同様である。しかし、本研究における測定では、ミニコンのサンプリング間隔が最高 $79.7 \mu\text{sec}$ (12.5 kHz/bit に相当) と決まっているので、走査周期を短くするためには、この出力信号を一担波形記憶装置に収め、信号の時間軸を低周波域に変換した後、ミニコンにて処理する必要がある。

4.3 密充てん状態における粒子の測定

Fig. 8 に粒子の密充てんの状態（この場合、一層の状態）における顕微鏡写真およびブラウン管写真を示した。a, b, c の粒子に対応するビデオ出力信号がブラウン管写真の a, b, c である。Fig. 8 に示したようにトリガレベルを設けることによって、おのおの

*2 なお、今後例えば流動層など流動挙動の激しい流動場における固体粒子の移動速度、およびその乱れ等を計測するためには、この波形記憶装置が不可欠なものとなる。同装置はイメージセンサの駆動回路の後に接続して用いられるものであるが、この場合高速書き込みが可能で、しかも記憶容量の大きいものが望ましい。

Fig. 8. Microphotograph and video output signals.

の粒子の径を決定することができる。しかし、厳密に

は隣接する球状粒子が点接触している部分を横切って測定した際には、透過光の回折によって測定誤差が生ずる危険があるものと思われるが、この点については今後検討して行きたい。

5 結 言

本報告で示したイメージセンサによる計測法を用いると、球形粒子の粒径および粒子移動速度の両者が同時にかなりよい精度で求められることがわかった。なお、今後は本法を流動層、沈降槽、およびホッパー内の固体粒子の挙動測定に用いて行きたい。

参 考 文 献

- 1) 椿淳一郎, 神保元二, 和出良一, 材料, **24**, 622 (1975).
- 2) 中尾弘三, “ファクシミリ” (1965) 東京電気大学出版局
- 3) 大木勝弥, 東京工業大学学位論文 (1975).
- 4) 上和野満雄, 長谷川誠, 大矢公夫, 化学工学協会第11回秋季大会, C220 (1977).
- 5) Reticon Corporation, カタログ67247, 57310.