画像によるホッパの流動状態の観察および レベル制御に関する研究

和田 憲造*, 岡 均*
生田 強史**, 早野 延男*

Observation of the Flow Pattern and Level
Control of a Hopper
by Using the Image Processing

by

Kenzou WADA[†], Hitoshi OKA[†], Tsuyoshi SYOUDA^{††}
and Nobuo HAYANO[†]

Recently, the technique of image processing has been used for many purposes. This report is concerned with the flow pattern and level control of a hopper by using an image processing apparatus.

The flow pattern of granules inside the hopper changes at the transitional bed height (H_{tr}). H_{tr} is the bed height at which flow pattern of granules changes from mass flow to core flow or vice versa. The flow pattern of granules is uniform in the upper part of H_{tr} . In this sense, it is easy to control the level of the hopper, because the surface of granules in the hopper is kept constant.

The flow pattern was first observed by using a video camera and image processing unit. The position of H_{tr} was measured. Then, the bed height of the hopper was controlled at the upper part of H_{tr} . The time to operate the image and to transmit the image data to a personal computer, and which is necessary for the image processing, was reduced to maintain good response waves. In order to do so, the area used for data processing of the flow pattern decreased, and the method of extracting useful information from the image data is discussed.

As for the results, we could obtain good response waves in the level control of hopper.

Key Words : Image Processing, Flow Pattern, Level Control,
Transitional Bed Height

1. 序 論

近代工業の分野で、画像処理装置は生産ラインにおける製品の検査、計測およびロボットの視覚センサなど

に用いられている。また、粉体工業の分野においても粉粒体の自動粒度測定装置などに使用されている。しかし、制御システムの検出端として用いられている例はほとんどない。

画像処理装置を検出端とした制御システムの利点としては、制御量として物理量が直接測定できない場合でも、視覚的に制御量の変化をとらえることができれば、制御を行うことが可能なことである。一方、問題点としては対象物の抽出方法の難しさ、画像情報の定量化および処理時間が長いことなどがあげられる。さ

昭和62年12月14日受付

粉体工学会昭和61年度秋期研究発表会(1986年、東京)にて発表

* 山口大学工学部生産機械工学科(〒755 宇部市常盤台)

TEL0836-31-5100 内線 329

** 現在 (株)島津製作所

† Department of Industrial Engineering, Faculty of

Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755

†† Shimadzu Co.

らに、制御を行ううえで画像処理に要する時間は、ある種のむだ時間と考えられることから、この処理時間はシステムの制御性能を大きく左右することになる。

本報では、粉粒体プロセスに多用されているホッパを対象として、まず画像処理装置およびビデオテープレコーダ(VTR)を用いて、ホッパ内の粉粒体の流動状態について調べた。つぎに画像処理装置を検出端、パソコンをコントローラ、ホッパを制御対象としてレベル制御システムを構成し、制御量の抽出方法、画像処理時間の短縮方法さらに画像処理装置を検出端とした制御システムの問題点などについて検討を行った。

2. 実験装置

実験装置の概略図をFig. 1に示す。実験用ホッパは非対称垂直壁型ホッパで、スカート部の角度は60度であり、使用する砂の安息角(39.0度)より十分大きなものとなっている。ホッパ前面は内部の状態が把握できるようにガラスで作られており、内壁は粒子との摩擦が小さくなるようにデコラ板製となっている。ホッパ下部には排出用バルブが取り付けられており、排出量は0~2000 g/sの間で連続可変である。

ホッパ上部にはサブホッパが設けられており、サブホッパ下部に取り付けられているバルブの開度を調整することにより、供給量を連続的に変化させることができる。粉粒体としては平均粒径335 μm の砂を用いた。

画像処理装置は画像処理装置本体、CRTターミナル、各種モニタ、タブレットディジタイザなどから構成されている。ビデオカメラによってとらえられた映像は、画像処理装置に1画面1/30秒の速さで取り込まれ、その画像は16段階の輝度レベルをもつ横512×縦480画素のデータとして画像メモリに記憶される。この取り込まれた画像(原画像)に種々の処理をほどこすことにより必要なデータの抽出を行うことができる。また、

処理を行うためのプログラムは処理時間の短縮のためアセンブラ言語を用いて記述した。

3. 画像処理法

画像処理方法には平滑化操作、二値化操作およびラプラシアン操作などがある¹⁻³⁾。平滑化操作は雑音を除去するために用いられており、ある種の平均化操作である。しかし、このために画像はぼかされ、エッジや線のような微細で急激に変化している部分が鈍化されるという欠点もある。

二値化操作は画像から対象物を抽出するのに用いられる方法で、画像に閾値処理をほどこすことにより行われる。Fig. 2に原画像、Fig. 3に原画像に二値化操作を施したときの処理結果を示す。二値化操作後の画像はホッパ側壁と砂の部分が白、他の部分が黒で表されている。

ラプラシアン操作とは輝度レベルの異なった領域の境界を線で表現するものであり、輝度レベルの微分操

Fig. 2 Original image

Fig. 3 Effect of threshold operation

Fig. 4 Effect of laplacian operation

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

作である。この操作をほどこすことにより急激な輝度レベルの変化を生じている部分が抽出され、領域間の境界を線として表すことができる。**Fig. 4**に二値化操作後の画像に、さらにラプラシアン操作を行った結果を示す。白と黒の境界のみが線で表されているのがわかる。

本実験では上記の処理をソフトウェアで行っているため、全画素に対しこの3操作を施すと約3分30秒を要し、このため画像処理装置を用いた制御システムを構成することが難しくなる。そこで、後に記した方法で画像処理時間の短縮をはかった。

4. ホッパ内部の流動状態の観察

ホッパから排出が開始されると、粉面は水平に降下していくが、ある層高を境にくぼみはじめ、流れはマス・フローからコア・フローへと変化する。この流れの状態が変化するときの層高を転移層高と呼ぶことにする。転移層高より上のマス・フロー域では長期間にわたって粉面が一定に保たれる⁴⁾。そこで、マス・フロー域でレベル制御を行うために、まずホッパ内部の粉粒体の流動状態を観察し、転移層高の位置について調べた。

本研究では層内にマーキング粒子を投入し、その状態をビデオカメラでとらえ、その映像を画像処理装置で処理し、そのデータをもとにパソコンによりマーキング粒子の軌跡や流下速度を算出するという方法を用いた。

4.1 実験方法

最初に、実験用ホッパの容器幅を120～240 mmの範囲で40 mmおきに变化させ、おのおのトレーサをホッパ前面に配置し流入量、流出量を変化させて、このときの粉粒体の流動状態をVTRで記録した。トレーサとしては市販の大豆(約 ϕ 5 mm)を半分に切り、これをさらに1/4にしたものを黒色に着色して用いた。次にVTRに記録された映像をある時間(降下速度により約0.5～5秒)ごとにサンプリングし、処理を施した。その結果、トレーサは黒い点としてディスプレイ上に現れる。この位置の座標をタブレットディジタイザを用いて検出し、そのデータをパソコンに転送する。一方、VTRには計時機能があり、トレーサの流下状態とともに1/100秒刻みの時刻が記録されており、この時刻をパソコンに入力することにより粉粒体の降下速度を求めた。

トレーサは、大豆の黒い切断面をホッパのガラス板に密着させて、層高700 mm、ホッパ左端30 mmのと

Fig. 5 Velocity vectors

ころから30 mmおきに配置し(**Fig. 5**参照)、その上に層高750 mmまで砂を入れ、この状態からバルブを開けて粉粒体を降下させた。

画像処理法として解像度の低下を抑えるため平滑化操作とラプラシアン操作を省略し、ここでは全画面に二値化操作のみをほどこすことにした。

粉粒体の流出のみを行った場合を非定常状態、流入流出を同時に行ない、層高を一定に保った場合を定常状態と呼ぶことにし、おのおの場合について実験を行った。

4.2 トレーサの降下速度

Fig. 5は容器幅160 mm、供給量 $Q_{in}=0$ および排出バルブ開度10 mmのときのおのおのトレーサの降下速度をベクトル表示したものである。実験ではさらに短い時間でサンプリングを行っているが、便宜上、見やすくするために、いくつかの点ごとにプロットしている。

枠内にある小円が初期のトレーサの位置である。この位置から転移層高まではトレーサはほぼ一様に降下しており、その層高を過ぎるとトレーサの位置により降下速度が異なってくる。転移層高以下ではスカート部の影響を受けて壁面付近の速度が小さくなるとともに、左向きの成分ができていく。また、出口付近では断面積の減少にともない粉粒体の速度が大きくなっている。このように流れの状態は転移層高を境にして変化していることから、層内の流れを観察し、トレーサの列が乱れ始めたときの層高を転移層高とした。

4.2.1 排出量による速度ベクトルの变化

排出量を変化させたときの層内の速度分布を調べた。その一例として、容器幅 $B=160$ mm、供給量 $Q_{in}=0$ 、排出バルブ開度 $E=4$ mm、8 mmのときの速度分布を**Fig. 6**に示す。図中の破線が転移層高を示している。転移層高までは速度はほぼ一定であるが、それ以下では各位置のトレーサの速度はその初期位置により変化

Fig. 6 Flow patterns at each width of hopper ($B = 160$)

し始める。また、排出量が大きいと転移層高までの平均速度も増加している。一方、転移層高についてみると排出量の変化にもかかわらず層高390 mm付近ではほぼ一定となっている。また、これらのことは他の容器幅についても同様である。

Fig. 7 に供給量 $Q_{in} = 0$ としたときの各容器幅における転移層高までの平均降下速度と排出量の関係を示す。転移層高より上部では流出量と平均降下速度はほぼ比例関係にあることがわかる。

4.2.2 容器幅による速度ベクトルの変化

Fig. 8 は供給量 $Q_{in} = 0$ 、排出バルブ開度 $E = 6$ mm とし、容器幅 $B = 120$ mm, 200 mm のときのホッパ内部の速度分布を示す。容器幅が大きいと降下速度が小さいのがわかる。また、スカート部における粉粒体の流れが停滞しており、速度境界線の存在も確認できる。 $B = 200$ mm の場合において右から3番目のトレーサによるベクトルが途中で消滅しているが、これは他のトレーサに比較してこのトレーサのみが早くガラス

Fig. 8 Flow patterns at each valve opening ($E = 6$)

Fig. 9 Relationship between transitional bed height and width of hopper

板から離れ、埋没してしまったためである。この図から容器幅が大きいくほど、ホッパ出口付近のトレーサの埋没が早く、その部分の流れの乱れが激しいことがわかる。また転移層高は、容器幅が大きくなるにしたがって高くなっている。

Fig. 9 に定常状態と、非定常状態における転移層高と容器幅の関係を示す。これから転移層高とホッパの容器幅は直線関係にあることがわかる。また、定常状態より非定常状態の方が転移層高が高い。このことは定常状態の方がマス・フロー領域が広いということを意味している。これは砂の流入により流動境界線が側壁から離れる位置が低くなったため、マス・フロー領域が拡大したものである。

以下に述べるレベル制御はこのマス・フロー領域で行うことにする。

5. レベル制御

5.1 システムのブロック線図

Fig. 10 に制御システムのブロック線図を示す。(a)

Fig. 7 Relationship between vertical velocity of solid and amount of valve opening ($Q_{in} = 0$)

Fig.10 Block diagram of control system

はシステムの構成要素で表したものであり、(b)はこれを伝達関数表示したものである。システムはホッパー、コントローラ、サーボモータ、減速ギア、ボールスクリーン、スライドバルブなどから構成されている。むだ時間要素は前述した画像処理に要する時間である。 R は設定値、 τ はサンプリング周期、 $Y(z)$ は制御量すなわち層高(ホッパー内の粉粒体のレベル)である。本システムは積分要素を多く含んでいるためコントローラとしては次式で示される位置形PD制御式⁵⁾を用いた。

$$G_c(z) = K_P + K_D \frac{z-1}{z} \quad (1)$$

5.2 画像処理時間の短縮方法

前述のように1画面の画像処理に3分30秒も要して

いたのでは制御系を構成するのは困難である。そこで、つぎのような方法で処理時間の短縮をはかった。

まず、平滑化操作については雑音を取り除くというメリットがあるが、粉面を線で表現するうえで、ほとんど影響をおよぼさないので省略することにした。二値化操作については、輝度レベル4以上は白、輝度レベル4未満は黒とした。また、この操作を全画素に対して行うのではなく、Fig.11(a)のように $x=1, y=1$ を基点とした a_1, b_1, c_1, d_1 の4画素を1ブロックと考え、 a_1 に対して二値化操作を行い、その処理結果を1ブロック(a_1, b_1, c_1, d_1)に格納する方法を用いた。以下同様につぎのブロック(a_2, b_2, c_2, d_2)についてもい、順次全画素に処理を施した。

ラプラシアン操作としては、二値化操作と同様に

Fig.11 Threshold and Laplacian operation

Fig. 11 (b)に示すように $x=0, y=0$ を基準とした4画素(a_i, b_i, c_i, d_i)を1ブロックと考え、次式で示される処理を行い、その結果をブロックの全画素に格納した。

$$|a_i - d_i| + |b_i - c_i| \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots)$$

この操作を二値化操作と同様に全画素にほどこした。以上の操作を1画面(512×480 画素)にほどこすことにより、処理時間を約6.6秒にまで短縮することができた。このように4画素単位で処理を行うと、処理時間が短縮されるかわりに解像度が低下するという問題が生じる。しかし、実際問題としてこれがレベル制御に与える影響は非常に少ない。

ここで、さらに処理時間の短縮をはかるために画像処理をほどこす面積を**Fig. 12**に示すように、ある一部分に限定した。粉面を検出するにはまず視野の最上部、左端から96画素の位置から、下方に向かって順次輝度レベルを比較し、その差が4以上になったときの点を粉面であると判断する。つぎにこの点を中心に上32画素、下16画素、左右各8画素の範囲のみに二値化、ラプラシアン操作をほどこすことにより、層高の検出を行った。また、粉面の高さも測定しており、さらに64画素($B=160$ mmのとき)右の位置での粉面を検出し同様の処理をほどこしている。実際の処理例を**Fig. 13**に示す。このように処理面積を大幅に縮小することによりレベル検出に要する時間を約0.26秒にまで短縮す

Fig. 12 Detection of level

Fig. 13 Detection of level and flow pattern

ることができた。

5.3 ビデオカメラと層高の位置関係

制御を行うに際してビデオカメラをホッパ前面のある高さに固定した。このために粉面とビデオカメラの位置関係には、つぎの三つの状態が存在する。すなわち、①カメラの視野よりも粉面が上にあり、カメラに粉面が写っていない場合、②粉面がカメラの視野内にある場合、③粉面がカメラの視野よりも下にある場合である。②の場合については前述の処理を行い、レベルの検出を行う。①、③の場合については次のような方法でその判断を行っている。

視野の最上部の輝度レベルのデータを取り、順次下方に向かって粉面の有無を調べる。粉面の有無は輝度レベルの差により検出する。もし粉面があれば先に述べた方法で処理する。粉面がない場合、つまり輝度レベルに差がなかった場合は、最下部の輝度レベルと最上部の輝度レベルとの比較を行う。このとき、その差が3以下であれば粉粒体であると判断する。これはホッパ前面に下方から照明をあてており、ホッパ内に粉粒体がある場合は下方が明るく、上にいくにしたがって暗くなる。また、粉粒体がない場合はホッパの内壁を黒に着色しているため、ホッパの上下で輝度レベルの差が生じないことからこのような判断を行った。制御に関しては①の場合はカメラの視野の最上端を、③の場合は視野の最下端を層高として処理を行った。

5.4 実験結果

実験は容器幅160mm、供給量を一定($Q_m=262$ g/s)とし、初期層高を変化させて行った。サンプリング周期は $\tau=1$ sとした。このときの応答波形の一例を**Figs. 14**および**15**に示す。

Fig. 14は初期層高750mm、設定層高650mm、初期バルブ開度0、 $K_P=0.001$ 、 $K_D=0.006$ として粉面がカメラの視野内にある場合の応答波形である。図中

Fig. 14 Response of PD control for the step reference input (level control)
($B=160$ $K_P=0.001$ $K_D=0.006$)

Fig. 15 Response of PD control for the step reference input (level control)
($B=160$ $K_P=0.001$ $K_D=0.01$)

U は操作量, H は層高, E はこのときのバルブ開度の変化を示している。点線は設定層高を表している。応答(層高)は約70秒でほぼ整定し設定層高に落ち着いている。

Fig. 15は初期層高 500 mm, 設定層高 700 mm, 初期バルブ開度 0, $K_P=0.001$, $K_D=0.01$ とし, 初期層高がカメラの視野よりも下にある場合である。最初の20秒ほどは層高がカメラの視野よりも下にあり, このときは視野の最下部を層高として処理しているため,

層高に平らな部分が生じている。実際の層高の変化は一点鎖線で示されている。応答波形はオーバーシュートもほとんどなく55秒ほどで整定している。

6. 結 言

画像処理を用いてホッパ内部の流動状態を調べた結果以下のことが明らかになった。

(1) 定常, 非定常の各場合についてホッパの容器幅を一定にしたとき, 転移層高はほぼ一定であり, ホッパの容器幅を大きくすると転移層高は高くなり, マス・フロー領域は減少する。

(2) 定常状態の方が非定常状態より転移層高は低く, マス・フロー領域は拡大する。

今回画像処理装置を検出端とした制御の一例としてレベル制御を行ったが, この場合については制御量の抽出および処理時間の短縮を適切に行うことで良好な応答波形をえることができた。今後, 粉粒体プロセスの制御において制御量が直接には測定できないが, 視覚的に把握できる場合については, 画像処理の利用は効果的である。

Nomenclature

E	: amount of slit opening	[mm]	R	: set point	[mm]
Q_{out}	: outflow rate	[g/s]	U	: manipulated value	[V]
Q_{in}	: inflow rate	[g/s]	Y	: output	[mm]
H	: bed height	[mm]	$G_c(z)$	: transfer function of controller	[-]
B	: width of hopper	[mm]	K_P, K_D	: gains of controller	[-]
H_{tr}	: transitional bed height	[mm]	τ	: sampling time	[s]
V_v	: vertical velocity of solid	[mm/s]			

References

- 1) Agui, T. and M. Nakajima: "Computer Gazou Syori", Sanpou Syuppan (1978)
- 2) Nagao, M.: "Digital Gazou Syori", Kindai Kagakusya (1978)
- 3) Tezuka, K., T. Kitabashi and H. Ogawa: "Digital Gazou Syori", Nikkan Kougyou Sinbunsha (1985)
- 4) Jotaki, T., N. Hayano and H. Yamanaka: *Nihon Kikaigakkai Ronbunshu*, **43**, [366], 628 (1977)
- 5) Yamashita, N. and S. Yasushi: "Digital Process Control", Corona-Sha (1969)