分散の難しい粉体の画像解析による粒度分布測定 へのアプローチ*

木村 淳,** 田辺 寛一郎**
山本 隆一,* 荒井 友之***

Particle Size Distribution Measurement of Coagulated Powders Using an Image Analyzer by

Atsushi KIMURA† Kan'ichiro TANABE† Ryu'ichi YAMAMOTO†
and Tomoyuki ARAI††

In this paper, a new particle size distribution measuring method using a LUZEX image analyzer is described. This method is effective even for measuring coagulated powder. Though many kinds of image analyzing systems have been applied to measure particle sizes and shapes for twenty years, it has been possible to measure only particles of good distribution, that is, particles without aggregation and flocculation. In this new method structural description and inference of particle patterns are used, and some experimental results are shown to illustrate the usefulness of the method for the measurement of badly distributed particles.

1. はじめに

画像解析による粒子径、粒度分布の計測が始められてからすでに20年が経過した。初期のころの多くの装置はテレビカメラからのアナログ信号を直接処理して水平走査線方向の直径を求めるものであった。その後マイクロプロセッサやICメモリーなどの進歩に伴い、アナログ信号をデジタル変換することによって画像をメモリーに記憶し、必要とされる殆どすべての代表径及び、形状データを求めることができるようになった。しかし、画像計測における最大の問題点は、機械自身が測定対象物に対する知識及び対象物の識別に必要な知識を持っていないため複雑な画像、例えば複数の粒子が重なり合って粒子群をなしている場合の

各粒子径の測定などは現在のところ不可能と考えられる。しかし、形状特徴の単純な粒子の重なり合った複数個の粒子を切り出し、これらの直径を求める試みが行われるようになった。最も簡易的でまたハードウェア化することにより高速化可能なアルゴリズムは田村¹⁾のものであろう。しかし、この手法では接触、ないしはそれに近い重なりを持つ円形粒子の分離にしか適応出来なかった。次に、坂上・高木²⁾の反復演算法ではかなり強く重なり合った円形粒子の分離が可能である。最近になって図形パターンの特徴抽出を階層的な概念にもとずいて行い、階層的特徴記述を行う試みが行われるようになった³⁾。また、松山⁴⁾は輪郭線をその線上において対称性を保存する区間に分割し、これをもとにした局所対称軸、角、変曲点を求め、局所的、大局的特徴をもとにした領域分割を試みている。そこで、ここでは輪郭線上において対称性を保存する区間に分割することにより輪郭情報を圧縮し、角・変曲点・区間長及び閉曲線領域全体の形状、濃度情報より階層的パターン解析を試みた。また、これらの手法の応用として、炭素微細粒子の電子顕微鏡画像に見られる様に、分散が難しい粒子画像の粒度分布測定に用いられる画像処理法を示し、汎用画像解析装置ルーゼック

昭和60年8月2日受付

* 第21回夏期シンポジウムにて発表(1985.7, 函南)

** (株)ニレコ(〒192 東京都八王子市石川町 2951-4)
TEL 0426-42-3111

*** (株)エルミックシステム(〒231 横浜市中区相生町 1-18)

† Image Products Dept, NIRECO Corporation, 2951-4, Ishikawa-cho, Hachioji, Tokyo 192

†† ELMIC SYSTEM Corporation
1-18 Ai0i-cho, Nakaku, Yokohama 231

ス 5,000 を用いたシステムでの実行例を紹介する。

2. 基本的手法

画像解析による粒子径計測を行う為の一般的システムをFig.1に示す。このブロック図から解る様に粒子計測においては多くの場合、濃淡画像から直接粒子径を求めるのではなく、濃淡画像を2値化することにより画像をより単純化したのちにデジタル信号・データ処理として各種の形状特徴量を求めている。さらにこの特徴量をもとにしてFig.2に示すような解析treeをもとにしたパターン解析を行う。

ここでの問題は、機械による計測と人間によるそれとの差であり、その原因には以下のような事が考えられる。

- (1) 機械の分解能による誤差
- (2) 何等かの理由により2値化出来ない(考えられる画像解析手法を使っても粒子としての領域を切り出す事が出来ない)事による誤差
- (3) 人間の視覚認識能力に対して、機械の能力が極端に貧弱なため複数の粒子からなる一群のものを1個の粒子として認識してしまう事による誤差
- (4) 人間の視覚認識能力によってもその特徴認識があいまいなため、十分な情報を機械に入力出来ない

Fig. 1 System configuration of image analysis system

Fig. 2 Recognition's tree-structure

い事から起る誤差

これらの問題のうち項1及び項2に関しては、主として光学系及び信号入力系の問題であり以下では主に項3及び項4に関して議論することとする。

画像解析装置の一般的用途としては、従来人間の視覚認識能力に頼って来た作業を機械に置き換える事が大多数である。ここでは、円形・球形ないしは長方形・直方体に近い粒形を持つ2次元投影像の解析を例として取り上げる。このような仮定をすることによって項4の問題を避けた訳である。

3. 重なった粒子の分離法

円盤または球形の粒が2または3次元に分散された状態の2次元投影像はFig.3のように4種類のタイプに分けられる。タイプ1では、各粒子は接触・重なりなどのない理想的な分散状態であるため最も下位クラスの解析装置により測定可能である。タイプ2では、各粒子間で接触を含んだ分散状態であり縮退・膨張(closing・opening)処理によって容易に各々の粒子に分離し測定可能となる。しかしこの処理では、タイプ3のように粒子の重なりが強くなるにつれて誤差が多少増加することになる。タイプ4では、各粒子間で鎖状の強い重なりが起っているため上記のような手法によっては粒子を分離出来ない。球状の物が鎖状に立体構造をなしているような粒子の投影像は非常に複雑な様相をなし、多くの場合その輪郭情報以外容易に信頼出来る粒子パターン情報を得る事が出来ないため、従来から坂上²⁾によってこのような円形パターン切り出しの研究が行われて来た。棒状・針状の粒子の切り出しに関しては、円形切り出しのような縮退・膨張はほ

実際の例としてここでは、円形・球形ないしは長方形・直方体に近い粒形を持つ2及び3次元粒子群の2次元投影像の解析を取り上げる。その理由は、重なり合った粒子の基本形状がより単純な数学的記述によって表現可能であるならば、パターンマッチングのためのプログラムまたはハードウェアを画像解析装置にインプリメントすることも容易なためである。最も単純に記述できるパターンは円形であろう。これはその中心座標(x, y)と半径(r)の2パラメータによって規定され、例外事項は長円及び正方形との判別のための推定円半径のばらつきのみである。この円形パターンマッチングは以下のようなプロセスでおこなう。

- (1) 特徴データ構造の作成
- (2) 特徴点座標より推定可能なすべての円を求める
- (3) 2項で求めたもののうち特徴点座標及び付近の推定円より最も信頼度の高い円をその付近での推定円として決定する

次に、幅を持った棒・繊維状の粒子のパターンマッチングを考える。これは円形よりかなり複雑なものとなり、**Fig. 2**に示すようなパターンの意味構造をもと

にしてマッチングを行う。このパターンの全てに共通な特徴は他の辺に比較してかなり長い平行な 2 辺が 1 組存在することである。この長辺が直線であれば棒状・鎖状粒子であり、曲線であるならば繊維状粒子に分けられる。また、棒・針状粒子はさらに端が鋭角のパターンを持つものを針状粒子、それ以外のものは棒状粒子であり長方形に近い形状である。以下には棒状粒子パターンマッチング及びその切り出しのプロセスを示す。

- (1) 特徴データ構造の作成
- (2) 端辺を求める
- (3) その端辺から粒子の輪郭を他の粒子との交差点まで2方向共にたどる
- (4) 3項目の情報を基にして繊維・棒状粒子のパターンマッチング及び切り出しを行う

以下では円形及び棒・繊維状粒子のパターンマッチング及び切り出しの具体的例を示し、円形粒子に関してはその精度を議論することにする。

4. 測定精度と評価

4.1 円形粒子

Fig. 3 に示した各粒子画像は、粒径分布が既に知られておりそれを **Fig. 3-1** に示す。**Fig. 3-2**, **Fig. 3-3**, **Fig. 3-4** には、**Fig. 3-1** と同一粒度分布の粒子に関して 3 種類の分散状態の画像を人工的に作り、(1)縮退・膨張処理の計測、(2)円形パターンマッチング処理後の計測の各処理後の画像及び計測結果を示す。また、これらの処理時間を **Table 1** に示す。理想的分散状態でない限りこれらを前処理なしに測定することは不可能である。また、縮退・膨張処理を行った場合粒径分布のばらつきがやや小さめに出てくるため、分布幅の広い粉体に対してはその使用のしかたに十分注意しなければなら

Fig. 3-1 First dispersion's type of particles

Original image

Pattern matching

Shrinking and extending

Dispersion type 2

```

Q.TY 120          MEAN .21475E+02 pt
S.D. .86332E+01 pt
                                     10 20 30 40 50 60 70 80
N      pt  Q.TY Q.TYX -----|-----|-----|-----|-----|
0      0.0000E+00 0 0.0
1      .40000E+01 0 6.7 ***
2      .60000E+01 10 8.3 ****
3      .12000E+02 9 7.5 ****
4      .16000E+02 19 15.0 *****
5      .20000E+02 18 15.0 *****
6      .24000E+02 24 20.0 *****
7      .28000E+02 15 12.5 *****
8      .32000E+02 9 7.5 *****
9      .36000E+02 6 5.0 ***
10     .40000E+02 2 1.7 *
11     .44000E+02 0 0.0
12     .48000E+02 0 0.0
13     .52000E+02 0 0.0
14     .56000E+02 0 0.0
15     .60000E+02 0 0.0
16     .64000E+02 0 0.0
17     .68000E+02 0 0.0
18     .72000E+02 0 0.0
19     .76000E+02 0 0.0
LM     .60000E+02 0

```

```

Q.TY 106          MEAN .24330E+02 pt
S.D. .56830E+01 pt
                                     10 20 30 40 50 60 70 80
N      pt  Q.TY Q.TYX -----|-----|-----|-----|-----|
0      0.0000E+00 0 0.0
1      .40000E+01 2 1.9 *
2      .60000E+01 0 0.0
3      .12000E+02 1 0.9
4      .16000E+02 16 15.1 *****
5      .20000E+02 21 19.8 *****
6      .24000E+02 35 31.1 *****
7      .28000E+02 22 20.8 *****
8      .32000E+02 9 8.5 *****
9      .36000E+02 2 1.9 *
10     .40000E+02 0 0.0
11     .44000E+02 0 0.0
12     .48000E+02 0 0.0
13     .52000E+02 0 0.0
14     .56000E+02 0 0.0
15     .60000E+02 0 0.0
16     .64000E+02 0 0.0
17     .68000E+02 0 0.0
18     .72000E+02 0 0.0
19     .76000E+02 0 0.0
LM     .60000E+02 0

```

Fig. 3-2 Second dispersion's type of particles

Table 1 The executing accuracy and speed for each dispersion's type

	Ideal dispersion	Dispersion type 2		Dispersion type 3		Dispersion type 4	
		Shrinking and extending	Pattern matching	Shrinking and extending	Pattern matching	Shrinking and extending	Pattern matching
Quantity	105	106	120	97	197	0	99
Mean diameter (Point)	24.8	24.3	21.4	24.4	23.7	0	24.4
Standard deviation (Point)	7.3	5.6	8.6	5.4	7.0	0	10.6
Execute time [s]	5.0	10.0	240.0	10.0	240.0	10.0	240.0

Original image

Pattern matching

Shrinking and extending

Dispersion type 3

DATE	NAME	SAMPL
PARAM	FIELD	
G. TY	107	MEAN .23794E+02 pt
S.D.	.70349E+01	MSK .20919E+06 pt*2
		10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----
H	pt	
0	.00000E+00	0 0.0
1	.40000E+01	2 1.9 *
2	.00000E+01	3 2.0 *
3	.12000E+02	4 3.7 **
4	.16000E+02	13 12.1 *****
5	.20000E+02	20 10.7 *****
6	.24000E+02	34 31.0 *****
7	.28000E+02	15 14.0 *****
8	.32000E+02	8 7.5 *****
9	.36000E+02	7 6.5 ****
10	.40000E+02	1 0.9 *
11	.44000E+02	0 0.0
12	.48000E+02	0 0.0
13	.52000E+02	0 0.0
14	.56000E+02	0 0.0
15	.60000E+02	0 0.0
16	.64000E+02	0 0.0
17	.68000E+02	0 0.0
18	.72000E+02	0 0.0
19	.76000E+02	0 0.0
20	.80000E+02	0 0.0

```

DATE      NAME      SAMPLE
PARAM CIRC D      7 FIELD
G.TY      97      NENI      .24423E+02      pt
S.D.      .5424DE+01      pt      NENK      .20210E+06      pt*2

      10      20      30      40      50      60      70      80      90      100
      - - - - -
H      pt      G.TY      G.TYX
0      0.0000E+00      0      0.0
1      .4000E+01      0      0.0
2      .6000E+01      0      0.0
3      .1200E+02      4      4.1 **
4      .1600E+02      12      12.4 ++++++
5      .2000E+02      21      21.6 ++++++
6      .2400E+02      36      37.1 ++++++
7      .2800E+02      13      13.4 ++++++
8      .3200E+02      8      8.2 +***
9      .3600E+02      3      3.1 **
10     .4000E+02      0      0.0
11     .4400E+02      0      0.0
12     .4800E+02      0      0.0
13     .5200E+02      0      0.0
14     .5600E+02      0      0.0
15     .6000E+02      0      0.0
16     .6400E+02      0      0.0
17     .6800E+02      0      0.0
18     .7200E+02      0      0.0
19     .7600E+02      0      0.0
LPH   .8000E+02      0      0.0

```

Fig. 3-3 Third dispersion's type of particles

ない。また、円形パターンマッチング法ではやや円形が崩れている場合には複数の粒子とする場合等があり人手による選択・削除などの必要な場合がある。

以上の事から縮退・膨張の処理時間に対して円形パターンマッチング法のそれは数10倍程度の時間が必要なたため軽微の重なり画像に対しては、縮退・膨張法が一般的には有利である事が分かる。しかし、強く重なった粒子群に対しては円形パターンマッチング法以外手段がなく、粒子群内側に推定される誤った粗大粒を手動で除去することによりかなり信頼性のある平均値及び分散の値を得られる事が解る。

4.2 針狀・纖維狀粒子

円形形状以外の物で比較的容易にパターン概念を記述できる物としては、棒状ないしは繊維状の粒径パターンがある。これらの形状の必要とされる計測デー

タは、円形状粒子の場合と異なり長径（繊維の場合には繊維長）及び短径（幅）となる。理想的分散状態の場合には長径には最大長または繊維長などが適用され、短径には最大長ないしは中心軸を求めこれらに直交する切片長の最大をそれとしている。**Fig. 4** には、人工的に作られた棒状ないしは繊維状の重なり合った粒子の切り出し処理結果を示す。この結果からもわかるように、端部での重なりがあった粒子に関しては多少の誤差を含んでいるがその他の粒子に関してはほぼその粒形が保存されている事がわかる。

4.3 実際画像による測定例

ここでは炭素微細粒子の電子顕微鏡像に対して上記の手法を用いて行った例を **Fig. 5** に、染色体の形態分類と並べかえに応用した例を **Fig. 6** に示す。

Original image

Pattern matching

Shrinking and extending

Dispersion type 4

DATE	PARAM	METHOD	NAME	FIELD	SAMPL
			Q.TY	99	MEAN .24394E+02 p1
			S.D.	.10603E+02	MASK .21570E+06 p1^2
			Q.TY	Q.TYX	10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
N	p1				
0	.00000E+00		0	0.0	
1	.40000E+01		1	1.0 *	
2	.80000E+01		5	5.1 ***	
3	.12000E+02		9	9.1 *****	
4	.16000E+02		16	16.2 *****	
5	.20000E+02		18	18.2 *****	
6	.24000E+02		27	27.3 *****	
7	.30000E+02		4	4.0 **	
8	.32000E+02		5	5.1 ***	
9	.36000E+02		6	6.1 ****	
10	.40000E+02		1	1.0 *	
11	.44000E+02		2	2.0 *	
12	.48000E+02		2	2.0 *	
13	.52000E+02		0	0.0	
14	.56000E+02		2	2.0 *	
15	.60000E+02		0	0.0	
16	.64000E+02		1	1.0 *	
17	.68000E+02		0	0.0	
18	.72000E+02		0	0.0	
19	.76000E+02		0	0.0	
LM	.80000E+02		0		

DATE	PARAM	CIRC X	NAME	FIELD	SAMPL
			Q.TY	0	MEAN .00000E+00
			S.D.	.00000E+00	MASK .20210E+06 p1^2
			Q.TY	Q.TYX	10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
N					
0	.00000E+00		0	0.0	
1	.40000E+01		0	0.0	
2	.80000E+01		0	0.0	
3	.12000E+02		0	0.0	
4	.16000E+02		0	0.0	
5	.20000E+02		0	0.0	
6	.24000E+02		0	0.0	
7	.28000E+02		0	0.0	
8	.32000E+02		0	0.0	
9	.36000E+02		0	0.0	
10	.40000E+02		0	0.0	
11	.44000E+02		0	0.0	
12	.48000E+02		0	0.0	
13	.52000E+02		0	0.0	
14	.56000E+02		0	0.0	
15	.60000E+02		0	0.0	
16	.64000E+02		0	0.0	
17	.68000E+02		0	0.0	
18	.72000E+02		0	0.0	
19	.76000E+02		0	0.0	
LM	.80000E+02		25		

Fig. 3-4 Fourth dispersion's type of particles

Original

Cut-line

Edge-line

Fig. 4 Extracting process of coagulated fiber or stick

Fig. 5 Application to the carbon black particles

Fig. 6 Analyzed and rearranged images of chromosomes

5. む す び

以上の様に重なり合った粒子を切り出し計測する手法に関して従来から行われて来た縮退・膨張法では、軽微の重なりには有効であるが強く重なった粒子に関しては無力であった。そこで輪郭情報を基本としたパターン解析により、従来計測が不可能とされていた悪い分散状態であっても計測を可能にする糸口を得ることができた。今後は、さらにこれを発展させ、より複雑な形状・重なりを持った対象物の解析を試みる予定

である。また、縮退・膨張法も含めたより効率的な汎自動切り出しアルゴリズムを開発することにより、画像解析による粒度分布測定の実用範囲が大きく広がることが可能になると考えられる。

謝 辞

粉体の計測などに関して多くの御助言をいただき、また今回多くのサンプルをお貸しくださった京都工芸繊維大学の荒川先生に謝辞を表します。

References

- 1) Tamura, H.: "Further consideration on line thinning schemes", PRL 66 DEC(1975)
- 2) Takagi, M. and K. Sakaue: "The analysis of moving granules in a pancreatic cell by digital moving image processing", Proc. 4th Int. Joint Conf. on Pattern Recognition, 735(1978)
- 3) Asada, H.: "A hierarchical shape representation from smoothed local symmetries", Information Processing Society of Japan, CV-32-5(1984)
- 4) Matuyama, T., K. Yonezawa, and K. Azuma: "Feature extraction and hierarchical decomposition for closed curve using averaging operations", Information Processing Society of Japan, CV-36-4(1985)
- 5) Matumoto, T.: Luzex 450, NIRECO News
- 6) Shimotori, A.: Luzex 500, NIRECO News