

擬似ブラウン運動による画像生成と光逆散乱手法を用いた
画像解析による粒子半径分布計測

百田 正広[†] 三浦 慎^{††} 三池 秀敏^{†††} 山田 健仁[†]
杉村 敦彦[†]

Particle Sizing Based on Image Creation by False Brownian Motion and
Image Analysis by Inverse Light Scattering

Masahiro MOMOTA[†], Shin MIURA^{††}, Hidetoshi MIIKE^{†††}, Takehito YAMADA[†],
and Atsuhiko SUGIMURA[†]

あらまし 円形粒子位置をランダムに移動させた多数枚の画像生成と、光散乱理論における逆散乱手法に基づく画像解析により、粒子半径分布計測を試みた。提案手法では、溶液中のブラウン運動粒子から得られる散乱パターンにおいては、粒子がランダムに移動することで統計的平均操作が行われていることに注目している。すなわち、円形粒子が複数個分布する画像を対象とし、粒子を擬似2次元ブラウン運動させた画像を生成し、画像の2次元フーリエ変換等のデジタル信号処理を行い、散乱パターンに相当する平滑化パワースペクトルを得ている。この得られた平滑化パワースペクトルに光散乱理論における逆散乱手法を用いることにより粒子半径分布計測を試みる。更に、スギ花粉粒子の顕微鏡画像に適用し、本手法の有効性を示す。

キーワード 粒径計測, 画像生成, ブラウン運動, 画像解析, 逆散乱手法

1. ま え が き

近年、粒子径を非接触で計測する種々の手法が試みられている [1]~[11]。光学的な粒径計測法では、観測領域に同時に多数の粒子が存在する場合にも、測定可能な方法として静的光散乱法が知られている [12]~[14]。溶液中に浮遊する粒子の粒径計測を行う静的光散乱法では、粒子のブラウン運動に伴い粒子相互の位置がランダムに変動することで、統計的平均操作が行われ、粒子間距離の散乱パターンへの影響が相殺されている。長時間平均を通して得られた平均散乱パターンに逆散乱手法を適用することで粒子分布計測が可能となる。こうした光学的な方法は、非接触、無侵襲で

計測可能という優れた特徴があるが、光学系の調整の煩雑さや観測領域の散乱粒子濃度の調整などいくつかの問題点がある。一方、可視化された粒子像に対しては、デジタル画像処理による方法が用いられている。代表的な手法として、ハフ変換を用いる方法がある [1]。この方法は、画像空間上のパターン形状特徴をパラメータ空間上に変換し、パラメータ空間上でパターンマッチングを行う方法である。しかし、対象画像中に大きさが異なるパターンが多数存在する場合、適用が困難になるなど [2] の指摘もある。その他、多角形近似による手法 [3] や、輪郭線画に注目した方法 [4] などが提案されているが、重なりのある粒子画像の場合、解析が困難になるなど、より高精度な自動計測法への要求は強い。我々は、輪郭抽出後に円やだ円形状の当てはめを基本とする通常の画像処理手法を用いる代わりに、画像の2次元フーリエ変換を基本とし、光散乱理論における逆散乱手法を用いることにより、粒子が複数個分布する場合の粒子半径分布計測を試みてきた。その際、静止画像を回転させる操作を行い多数枚の画像を生成することで、統計的操作を行い、フーリエ変換像への粒子間距離の影響を少なくし、逆散乱

[†] 徳山工業高等専門学校情報電子工学科, 徳山市
Department of Computer Science and Electronic Engineering, Tokuyama College of Technology, Tokuyama-shi, 745-8585 Japan

^{††} 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 石川県
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Hokuriku, Tatuguchi-cho, Ishikawa-ken, 923-1292 Japan

^{†††} 山口大学工学部感性デザイン工学科, 宇部市
Department of KANSEI Design and Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi, 755-8611 Japan

手法の適用を可能にした。本論文では、回転操作を行う代わりに、粒子位置を互いにランダムに配置することで多数枚の画像生成を行い、この画像群に対して粒子間距離のより効果的な統計的平均を行う手法を提案する。この手法は、前報 [15], [16] で提案した静止画の回転による統計的平均操作に比べて、粒子半径分布計測の精度向上が図れることを示す。

2. 解析原理

画像の 2 次元フーリエ変換と静的光散乱法を用いた粒子半径分布計測については、その詳細を既に報告しているが、今回の提案のキーポイントを明確にするために、以下基本原理を簡単に紹介する。1 次元散乱体での粒径評価手順を示すと図 1 のようになる。高さ 1, 幅 $2a$ の方形波が入力波形として与えられたとする (図 1(a))。この波形をフーリエ変換し、パワースペクトルを求め逆フーリエ変換することで、自己相関関数

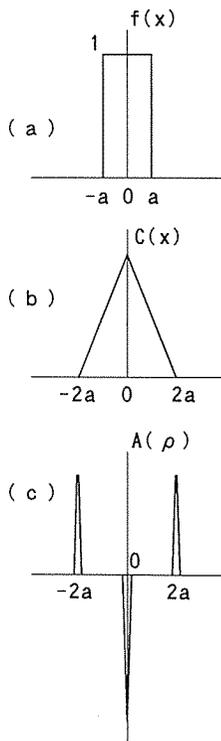


図 1 1 次元散乱体の粒径評価手順

Fig. 1 Principle of the analysis for particle sizing in the 1-D case. (a) Original image (single particle: 1D). (b) The autocorrelation function. (c) δ -function obtained by the differential operation.

が得られる (図 1(b))。この自己相関関数に微分操作を行うことで粒径 (幅 $2a$) を表す位置にデルタ関数を得ることができる (図 1(c))。これを 2 次元に拡張すると、逆フーリエ変換の部分が逆円柱ベッセル変換となり円形粒子の粒子半径分布計測が可能となる [14]。我々は、この説明に対応する操作をデジタル画像処理で実現することにより、粒径計測が可能であることを示してきた [15]~[17]。その際、問題となるのは粒子間距離の情報が粒径の情報に重なることである。粒子間距離は通常粒径より大きいと仮定すると、この粒子間の情報は、規格化したスペクトルを考えた場合、余分の周期性となり、実際の粒径についてのスペクトルの包絡線 [15] より小さな値となり、本来必要とするパワースペクトルを下げる効果がある。すなわち、実際の粒径とは異なる周期性が混入し、パワースペクトルが乱れる。そこで前報 [15], [16] では、原画像を回転した画像を複数枚作成することで粒子間距離の x 成分, y 成分を変化させ、円形粒子の粒径情報が、回転角度に依存しないことを利用し、各画像の空間パワースペクトルを加算することでその影響をおさえ、粒径の情報を抽出した。しかし、この画像回転による画像生成では、元来の粒子間距離は変化せず、 x 成分, y 成分の割合が変化するのみであり、与えられる原画像によっては統計的平均操作が不十分で、粒子間距離の影響がパワースペクトルに残り、粒径評価に影響を与える場合があった。そこで、本論文では、粒子位置を互いに重ならないようランダム移動させることで多数枚の画像を生成し、これに対する空間パワースペクトルの平均をとることで粒子間距離の影響を取り除くことを試みた。評価手順を図 2 に示す。まず、1 枚の $M[\text{pixel}] \times M[\text{pixel}]$ の 2 次元原画像 (2 値化画像) を考える。次に、原画像中の粒子の輪郭線追跡処理を行い [18]、原画像中の粒子位置を調べる。その際、重なりがある粒子像も一つのクラスタとして取り扱う。得られた情報をもとに、原画像の粒子位置をランダム移動させ N 枚の動画像を生成する。ここでは、処理時間を考慮し、1 枚ごとの輪郭線追跡処理は行わず原画像データをもとに時刻を種とする擬似乱数を用いて粒子位置を決定し N 枚の画像生成を行う。画像生成後の解析手順は前報 [15]~[17] と同様で、得られた多数枚の画像を 2 次元フーリエ変換しパワースペクトルを求め、スムージング等のデジタル信号処理を行うことにより、光散乱理論における散乱パターン $I(k_s)$ に対応する平滑化パワースペクトル $\bar{V}(k_s)$ を求める。

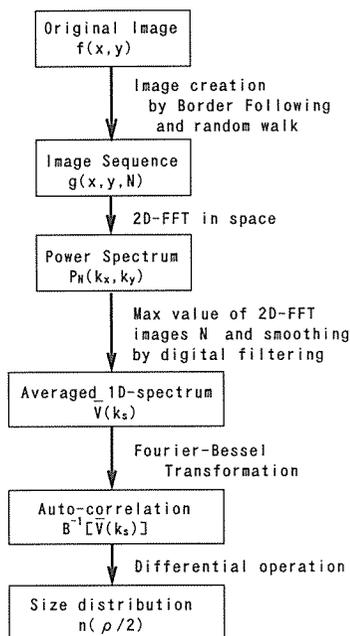


図2 逆散乱手法に基づく画像処理による粒子半径分布計測手順

Fig.2 Flowchart for the particle size evaluation by digital image processing based on the inverse light scattering theory.

このようにして得られたスペクトル像 $\bar{V}(k_s)$ をもとに、光散乱理論に基づくデジタル画像処理による粒子半径分布解析を行うこととなる。なお、粒子半径分布解析式についての詳細は文献 [14], [15] を参照されたい。

3. 計算機シミュレーションによる検討

原画像は、2 値化された円形粒子画像を用いた。回転処理を用いる従来の解析手順では、回転角 $\theta_0 = 15^\circ$ (0° から 165°) の異なる 12 枚の画像を必要としたが [15]、ここでは画像枚数を減らすことの可能性を探るために、12 枚の回転処理を用いた画像と 6 枚のランダム移動を用いた画像を原画像より生成し検討する。また今回対象としたシミュレーション画像は、回転処理を用いた場合にあまり良い結果が得られなかった画像例をあえて取り上げて解析を試みている。解析対象とした粒子画像例を図 3 に示す。図 3(a) は原画像を一定間隔 θ_n ずつ回転することで得られる N 枚の画像生成を示す。図 3(b) は原画像の粒子の輪郭線追跡処理後、各クラスが重ならないように、また画像範囲から出入りがないように、乱数を用いたランダム移動

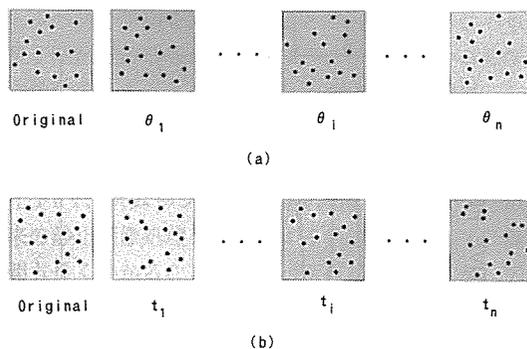


図3 粒子画像生成

Fig.3 Creation of particle image sequence. (a) Image sequence creation by rotation. (b) Image sequence creation by randomly walking particles model.

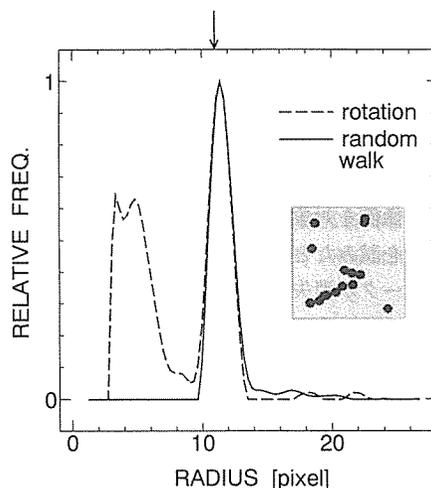


図4 多粒子画像の粒径分布解析例

Fig.4 Simulation image and evaluation of particle size distribution for an image including 15 particles with radius of 11 pixel.

させることで得られる N 枚の画像生成を示す。

3.1 多粒子、同一粒径の場合

まず、フレームサイズ $256[\text{pixel}] \times 256[\text{pixel}]$ の画像中に粒子半径 $11[\text{pixel}]$ の粒子 15 個を、ランダムな位置に配置したシミュレーション画像を作成し、画像の回転処理を用いた方法と画像内の粒子をランダム移動させた方法で画像生成を行い解析を試みた。その際、個々の粒子の重なりを認めたシミュレーション画像 (図 4 中写真) で解析を試みた。回転処理を用いた方法では、12 枚以上の画像を用いても得られる結果に大差はなく、図 4 (破線) に示すように粒子半径より

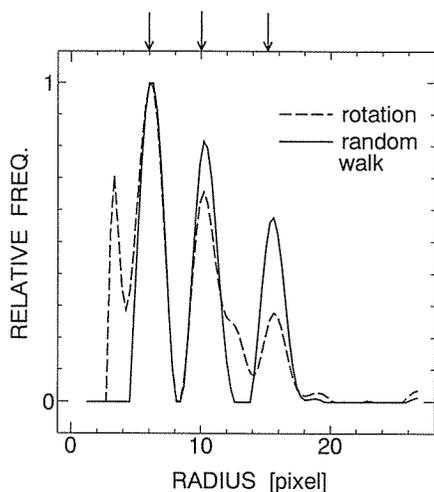


図5 粒子半径が異なる3粒子の解析例
Fig.5 Evaluation of particle size for an image including 3 particles with different radius (6 pixel, 10 pixel and 15 pixel).

小さい位置に偽のピークが得られる場合がある。そのような画像例を対象に、粒子をランダム移動させた方法で解析を試みたところ、粒子半径より小さい位置での偽のピークが消失し、良好な結果を得ることができた(図4(実線))。また、図に示すような重なりがある粒子像においても解析が可能なが示せた。この場合ランダム移動させる方法でも、重なりがある粒子像に含まれる粒子間距離の情報は取り除くことができないが、離れている粒子間の距離情報は、ランダムに変化しており、より効果的な統計的平均操作が行われたと思われる。

3.2 異粒子、異粒径の場合

次に $256[\text{pixel}] \times 256[\text{pixel}]$ の画像中に、粒子半径 $6[\text{pixel}]$ 、粒子半径 $10[\text{pixel}]$ 、粒子半径 $15[\text{pixel}]$ の粒子が各々1個ずつ必ず存在するシミュレーション画像を作成し、画像の回転処理を用いた従来法と画像内の粒子ランダム移動したものとの解析を行った。図5において、実線が粒子位置をランダムに移動させる方法を用いた場合の解析結果を、破線が回転処理を用いた解析結果を示す。ピークの高さが異なるもののほぼ与えられた位置にピーク(↓印)が得られた。特に、回転処理を用いた結果に比べ、粒子位置をランダムに移動する方法では偽のピークが消え、与えた粒子半径位置にはっきりしたピークが現れており、ランダム移動させる方法で粒子間距離の影響を改善できる可能性

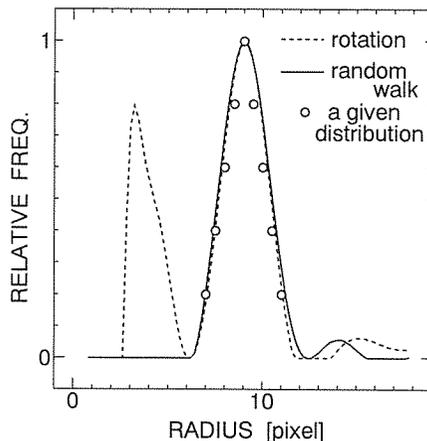


図6 粒子半径が分布している場合の解析例
Fig.6 Evaluation of particle size distribution for an image including 25 particles having mean radius size 9 pixel and SD of 1.8 pixel.

がある。

3.3 粒子半径がガウス状に分布する場合

次に $256[\text{pixel}] \times 256[\text{pixel}]$ の画像中に平均粒子半径 $9[\text{pixel}]$ 、粒子個数 25 個、標準偏差 1.8 で粒径が分布する場合について検討した。図6において、○が実際に与えた粒子半径分布であり、実線が粒子をランダム移動させた場合の解析結果、破線が回転処理を用いた場合の解析結果である。回転処理を用いた方法において、粒径より小さい位置で偽のピークが得られ与えた分布と異なる結果が得られる場合でも、粒子をランダム移動させる方法では、与えた分布と解析結果には、ほとんど差はなく良い結果を得ている。

4. 実画像の解析例

提案したランダム移動手法を用いて実際の画像の解析を試みた。解析に使用したシステムは、画像入力インタフェースボード (Microtechnica: MT98FMM)、テレビカメラ (National: WV-1850)、パーソナルコンピュータ (NEC: PC-9801EX) で画像を取り込み、ワークステーション (IBM: POWER station 520) で解析を行った。解析した画像はガラス板の上に任意に飛散させたスギ花粉粒子を用いた。粒子平均直径は、実際に取り込んだ画像から、 $23[\text{pixel}]$ 程度であることを視察により確認している。図7に解析に使用した画像 ($256[\text{pixel}] \times 256[\text{pixel}]$) および、解析結果を示す。粒子半径 $11[\text{pixel}]$ の位置(↓印)に鋭いピークが得られ、視察の結果ともほぼ一致しており、提案す

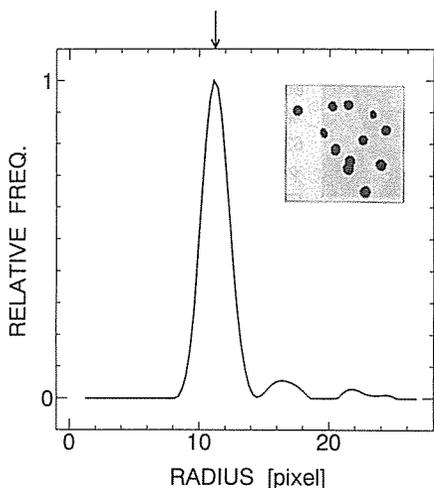


図7 スギ花粉粒子の解析結果
Fig.7 Evaluation of particle size for a real image of Japanese cedar pollen particles.

る手法の有効性が確認された。また、原画像の2次元フーリエ変換を行った際の直流分と提案する手法により得られた粒子径をもとに粒子数の評価を行った。原画像から得られたパワースペクトル直流分と、提案手法により得られた粒子直径をもとに、画像中に1粒子存在するシミュレーション画像を作成し得られた直流分との比は、7.02:0.60であった。実際の粒径にばらつきがあるため正確な粒子数を計測するのは困難であるが、原画像には約12個の粒子が存在することがわかり、目視による結果とほぼ同じ値が得られた。このことから、花粉粒子の飛散個数の計測の可能性を示せた。

5. むすび

本論文では、前報で提案した光散乱の逆散乱手法に基づく粒子半径分布計測法を大きく改善できる手法を提案した。可視化された粒子画像に対して、従来のデジタル画像処理では、輪郭抽出や円、だ円の当てはめ法が用いられている。我々は、こうした手法とは全く異なるアプローチにより粒子半径分布計測や粒子数計測が可能な手法（静的光散乱理論に基づく画像処理法）を提案してきた[15],[16]。ここでは、溶液中に懸濁したブラウン粒子の静的光散乱手法にヒントを得て、静止画として与えられた原画像中の粒子分布に対し、各粒子位置をランダムに移動させ（擬似ブラウン運動）画像生成する手法を導入した。この手法により、得られた多数枚の画像に対する空間パワースペク

トルの統計平均を実行することで、粒径解析に不要な粒子間距離の情報が空間パワースペクトルから効果的に削除できることを確認した。更に、前報で用いた回転処理を行う場合と比較し、使用画像枚数を減らすことも可能となった。また本方法は、動画像生成、2次元FFT、スムージング等の多段階処理を行うため従来の静止画像処理を基本とする手法と比較して計算時間も長くかかるなど改良すべき点は多くあるが、アルゴリズムの単純さなど従来法にはない長所も期待できる。なお、計測できる粒子の大きさ、数および密度については、取り扱う画像の大きさによるが、フレームサイズ 256 [pixel] × 256 [pixel] の画像中に粒子半径 20 [pixel] の粒子が 25 個存在する程度までは計測可能なことを確認している。粒子の重なりの方の評価、粒子密度が非常に高い場合の解析法の確立、粒子半径分布計測における誤差の問題などの解決が今後の課題である。

謝辞 本研究を進める上で有用な助言を頂いた山口大学工学部知能情報システム工学科古賀和利氏、および宇部工業高等専門学校電気工学科橋本基氏に謝意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（基盤研究（C）（2）：課題番号 08680420）によって行った。

文 献

- [1] 與水大和, “ハフ変換,” O plus E, pp.94-99, 1995.
- [2] 魏 軍, 萩原義裕, 小畑秀文, “曲線あてはめによる楕円状粒子計測法,” 信学技報, IE97-5, 1997.
- [3] 久保文雄, 坂上勝彦, “多角形近似を用いた重なり合った粒子像の分離手法,” 信学論 (D), vol.J71-D, no.9, pp.1852-1854, Sept. 1988.
- [4] 武田昌一, 柏岡誠治, “円形状の抽出アルゴリズムとその重量物体認識への応用,” 電学論 C, pp.7-14, 1982.
- [5] 田村誠也, 斎藤敏史, 西端 健, “光散乱法によるポリスチレン粒子の直径の精密測定,” 計測自動制御学会論文集, vol.25, pp.962-968, 1989.
- [6] J. Ritonga, T. Ushizaka, and T. Asakura, “Grating velocimeter signals: Visibility characteristics and application to the particle sizing,” J. Optics (paris), vol.21, pp.9-18, 1990.
- [7] 北山正文, 園田高久, “顕微鏡画像処理による微粉炭粒子表面積計測法,” 計測自動制御学会論文集, vol.31, pp.1297-1303, 1995.
- [8] 越塚 寛, 清水孝一, “干渉縞を利用したサブミクロン粒子の検出法,” O plus E, 154, pp.102-108, 1992.
- [9] 田辺寛一郎, 木村 淳, “画像特徴の定量化および解析・計測の実際,” O plus E, 104, pp.150-167, 1988.
- [10] K. Muramoto, “Determination of shape and fall velocity of raindrops by image processing,” IEICE Trans, vol.E78-D, no.8, pp.1051-1057, Aug. 1995.

- [11] 木村 毅, 三池秀敏, 山本英明, 百田正広, “動的光散乱理論に基づく動画処理によるブラウン粒子の粒径評価,” 信学論 (D-II), vol.J76-D-II, no.9, pp.1987-1993, Sept. 1993.
- [12] 橋本 基, 清水孝一, 松本伍良, “二次元散乱対の粒径分布解析法,” 応用物理, vol.54, pp.721-725, 1985.
- [13] 橋本 基, “光散乱を利用した生体微粒子の粒径分布計測に関する研究,” 学位論文 (北海道大学), 1986.
- [14] 清水孝一, 石丸 昭, “フーリエ変換による逆散乱問題の一解法 (低濃度散乱粒径分布の決定),” 応用物理, vol.52, no.4, pp.354-360, 1983.
- [15] 百田正広, 橋本 基, 多田伸行, 三池秀敏, “フーリエ解析を用いたデジタル画像処理による粒径解析,” 信学論 (D-II), vol.J75-D-II, no.7, pp.1143-1150, July 1992.
- [16] M. Momota, H. Miike, and H. Hashimoto, “Measuring particle size distribution by digital image processing with inverse fourier—Bessel transformation,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.33, pp.1189-1194, 1994.
- [17] 三池秀敏, 古賀和利編著, “パソコンによる動画処理,” pp.107-117, 森北出版, 1993.
- [18] 長谷川順一, 興水大知, 中山 晶, 横井茂樹共著, “画像処理の基本技法 <技法入門編>,” pp.70-72, 技術評論社, 1986.

(平成 10 年 1 月 14 日受付, 5 月 8 日再受付)



百田 正広 (正員)

昭 54 山口大・工・電気卒。同年徳山工業高等専門学校情報電子工学科助手。現在、同学科教授。この間、平 3 山口大学工学部電気電子工学科に内地留学。博士 (工学)。画像計測に関する研究に従事。情報処理学会会員。



三浦 慎 (学生員)

平 9 徳山高専・専攻科・情報電子工学専攻卒。同年北陸先端科学技術大学院大学入学。



三池 秀敏 (正員)

昭 46 九大・工・電気卒。昭 51 同大大学院博士課程了。同年山口大・工・電気助手。現在、同大学感性デザイン工学科教授。昭 62 年度および昭 63 年 7 月～9 月西独マックスプランク研究所 (ドルトムント) 招聘研究員。動画処理による物理計測、非平衡化学反応系の非線形パターンダイナミクス、流体現象等に関する研究に従事。工博。電気学会、情報処理学会、日本物理学会、形の科学会各会員。



山田 健仁 (正員)

昭 54 山口大・工・電気卒。昭 56 同大大学院修士課程了。同年東芝入社。平 7 徳山工業高等専門学校機械電気工学科助教授。平 8 同校情報電子工学科助教授。博士 (工学)。動画情報を用いた制御系の研究に従事。日本機械学会会員。



杉村 敦彦 (正員)

昭 60 豊橋技科大・工・電気電子卒。昭 62 同大大学院修士課程了。同年、徳山工業高等専門学校助手。現在、情報電子工学科講師。画像処理に関する研究に従事。応用物理学会、日本機械学会各会員。