

無定形・透明・微小物の数量測定システム —デジタルカメラの応用技術—

黒 田 正治郎

要旨

市販のデジタルカメラとパーソナルコンピュータを組み合わせ、無定形で透明な微小物の数量と大きさを実時間で計測できるシステムの開発を試みた。このシステムは、低価格性、高汎用性、高可搬性を特徴とする。

キーワード

計測システム、低価格性、高汎用性、高可搬性、デジタルカメラ

A Quantity Measurement System of Minute, Formless and Transparent Objects —The Applied Technology of a Digital Camera—

Kuroda, Shoziro

Abstract

Using a standard personal computer and a digital camera on the market, I experimentally devised a system which is able to measured the size and number of minute, formless and transparent objects.

This system is characterized by high portability and high-cost-performance and high versatility.

Key Words

measurements system, high portability, high-cost-performance, high versatility, digital camera

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システム設計
- § 3. プロトタイプによる予備実験
- § 4. 測定結果
- § 5. 実験結果
- § 6. 大きさ測定への応用
- § 7. 今後の改良

§ 1. はじめに

専用の CCD カメラとハードウェア、さらには専用のソフトウェアを組み合わせ、商品の数量や大きさを測定する工業用映像処理システムは多くある⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。しかし多くの場合、高額である。また、形状認識や数量計測の検出精度を上げ、異物の混入や破損などによる形状の異なるものを検出できるように、被対象物とシステムの距離を一定にしたり、被対象物の形状を定型化している。

さらに、被対象物の色を限定することにより色抽出を容易にするなど、特定の機能に特化したシステムとなっていることが多く、汎用性が低く可搬性が乏しいシステムとなっている。

そこで、市販のデジタルカメラとパーソナルコンピュータ（以降：PC）を組み合わせ、低価格性、高汎用性、高可搬性を有しながら、実時間で被対象物の大きさと個数が計測できるシステムの開発を試みた。

§ 2. システム設計

本システム開発の目的は、市販のデジタルカメラと PC を組み合わせたコストパフォーマンスに優れた微小物計測システムの可能性を検討するものである。システム構築の条件として、無定形で微小な物を被対象物とし、複数個を同時に計測できるようにした。また、被対象物が有色の場合、デジタルフィルタを使用することにより背景との分離が容易に行えるが、透明体の場合にはその検出は困難である。そのため、システム計測の条件に透明体という属性を加え、本システムの測定対象として、これらの属性を有する雨滴を取り上げることにした。もし、雨滴のような属性を有する物体の大きさを、実時間で高精度に計測可能なシステムが開発できれば、例えば開花数、種子の数、小動物の数、飛翔する鳥群などの、より軽度な条件を有する被対象物も容易に測定可能となると考えられる。

落下中の雨滴を計測する場合、半径 1.0mm の

雨滴の最終落下速度は $\sim 6.80\text{m/sec}$ になるので⁽⁷⁾、シャッタ速度 $1/2,000$ 秒で撮影すると 3.4mm 落下し、雨滴の直径の約 3 倍以上も流れた映像となる。したがって、高画質の画像を撮影し形状計測の精度を上げるには、 $1/2,000$ 秒以上の高速なシャッタ速度で撮影できるデジタルカメラと高照度を確保するための照明機材が必要となる。しかし、これらの機材を導入することは、本システムの開発指針として不適であり、可搬性にも欠けることになる。

そこで、落下中の雨滴をリアルタイムで計測することを最終目標とするが、検出エンジンを含む計測システムの確立を目指すプロトタイプとして、落下中の雨滴ではなく、測定用シートに落下した雨滴が測定できるシステム開発を試みる。

§ 3. プロトタイプによる予備実験

本システムの可能性と発展性を検討するために、雨滴を受け止める測定シートを装備したプロトタイプを準備した。測定用シートは、吸水性が無く撥水性が高いこと、付着した雨滴ができるだけ球状になるもので、透明かつ適度な引っ張り強度を持つものが条件となる。そこでいくつかの素材で試作した結果、雨傘の素材を用いることにした。そのサイズは、 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ であり、たわみができないように水平に張った。この測定用シートとデジタルカメラとの距離を 10cm に固定し、降り始めのころの雨滴を約30秒間採取した後、次のシステム条件で撮影した。なお、デジタルカメラのその他の設定はノーマルとした。

- デジタルカメラ : CASIO-EXFH25
- シャッタースピード : Auto
- 露光&ISO : Auto
- 画像条件 : $1,024 \times 768$ Pixel ~ $3,648 \times 2,736$ Pixel
- 保存形式 : Jpeg
- 開発言語 : VisualStuido
- CPU : i7-860 (2.8GHz)

プロトタイプを検出エンジンは、多くの画像処理方法のうち形状計測で組み込まれることが多いグレースケール処理、2値化処理とラベリングを組み合わせることとした⁽⁸⁾。

グレースケール処理は、フルカラー画像を256階調のグレースケールに変換するものであり、2値化処理は、設定した閾値により画像を白黒の2階調で描画する処理方法である。また、個々の被対象物を識別するラベリングは、繋がった画素（以降 Pixel）に同じ番号を付け、繋がっていない Pixel には異なる番号を付けて被対象物の形状や大きさを識別する方法である。

プロトタイプでの画像処理は、撮影した画像の各 Pixel 値を RGB 成分に分離し、その RGB 値の中で最大値を示した色相に対してグレースケール処理を行った。さらに閾値を設定し、被対象物を黒とし背景を白で描画する2値化処理^{(9)~(15)}を行ったところ、図1が示すように検出精度には閾値が大きく影響することが分かった。また、閾値=180以上では被対象物の輪郭が太くなり、背景部分にノイズが多く見られるようになった。

§ 4. 測定結果

図1に示したように、閾値により検出数が影響される原因として、測定用シートに付着した時の形状が完全な円形ではないこと、また雨滴が透明であるため、雨滴を通過した光が雨滴の外周部分で屈折し生じた陰影が雨粒の周りに2重線となって見えることなどが考えられる。また、雨滴を計測した結果、目視による計測の約 60sec に対して、PC による自動計測時間は 125sec と遅かった。

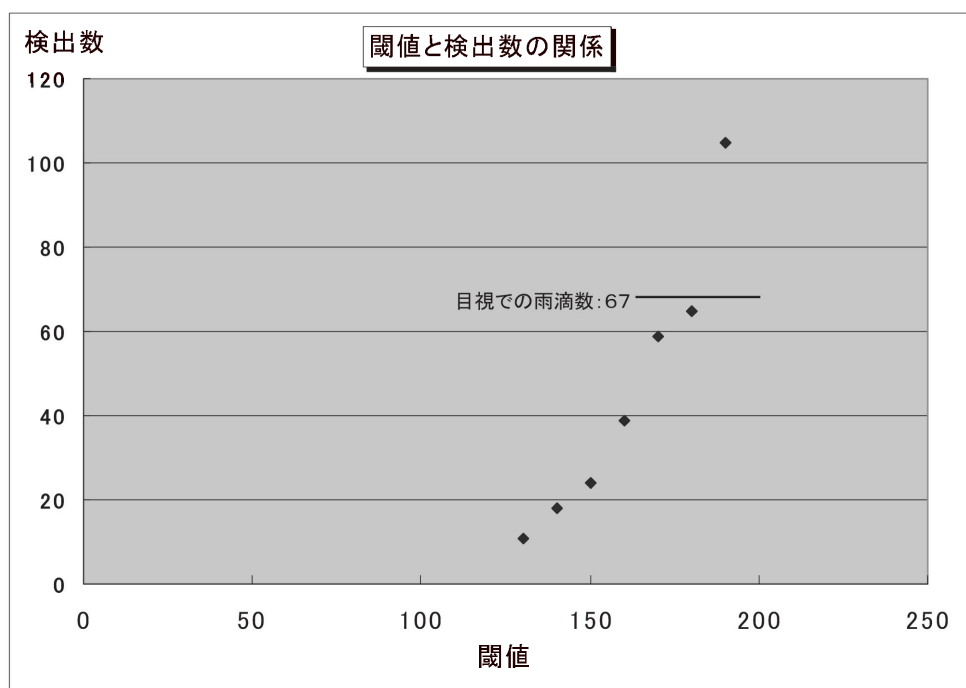
そこで、検出速度の改善と検出精度を向上するために、次の4つの要素の試みに取り組んだ。

- (1) 雨滴などの透明体にも対応できるデジタルフィルタの開発
- (2) 計測時間の短縮化のために計測プログラムのアルゴリズムの開発とその最適化
- (3) Exif 情報の読みとり
- (4) 画像の情報から被対象物の実寸を算出するための標準スケールの作成

§ 5. 実験結果

システムのフローチャートを、図2に示す。

図1 閾値と検出数の関係



(1) 透明体対応デジタルフィルタの開発

① グレー化処理

処理方法はプロトタイプと同様であり、各 Pixel 値を RGB 値に分離し256階調でグレー化を行った。グレー化による背景と被対象物との分離が検出精度に大きく影響するため、画像の背景を数点抽出し、その平均値から閾値を決めた。また、この方法により、汎用性も向上すると期待できる。

② 輪郭抽出処理

被対象物が水のような透明体で、その直径が1mm 以上の雨滴になると、外周部分に光が透過しない領域が幅の広い陰影となり顕著な2重輪郭になる。これが、通常の輪郭処理だけを組み込んだプロトタイプで読みとり誤差を生じさせる要因である。そこで、次の機能を有し、この部分を選択的に抽出し除去するフィルタを開発した。このフィルタによる結果を図3に示す。

図2 計測システムのフローチャート

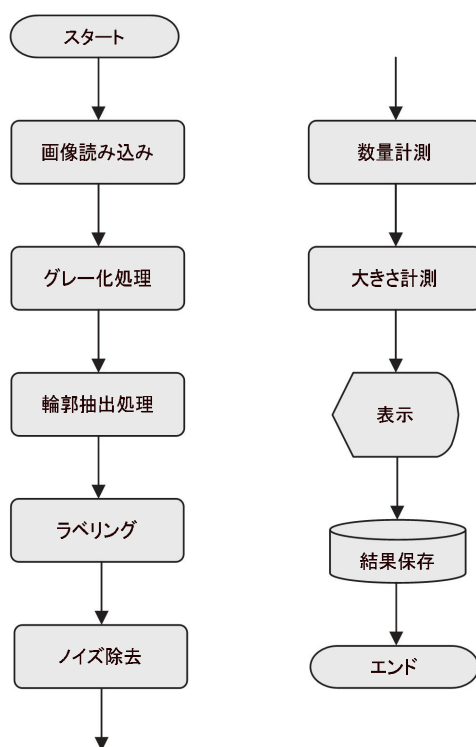
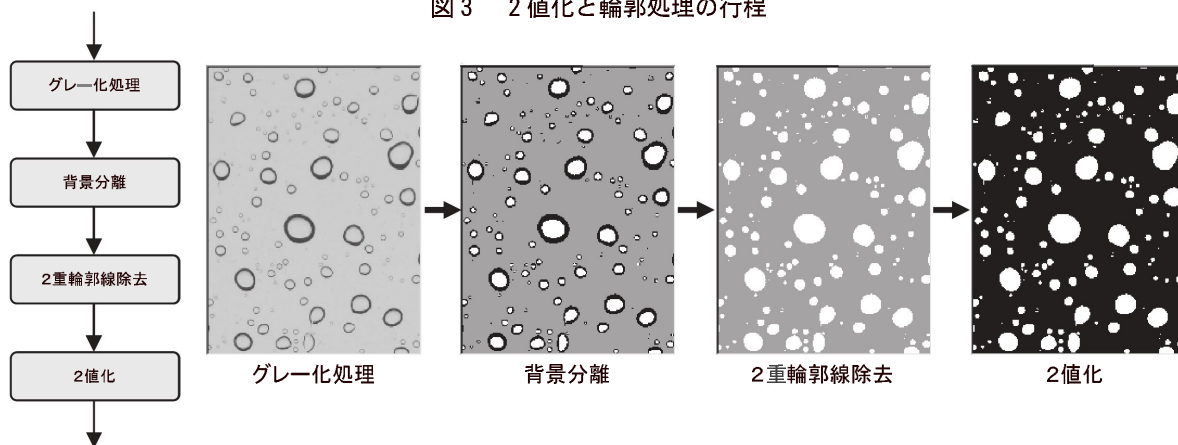


図3 2値化と輪郭処理の行程



(2) 計測用アルゴリズムの開発と最適化

① ラベリング処理

通常のラベリングでは、2 値化により黒に変えられた Pixel が縦もしくは横に連なっている場合には、連続した同一図形と判断して同じ数値を付けるので、被対象物が滑らかな境界面を持つ物体の場合には有効である。しかし、2 値化した後、画像中に記録されている被対象物の画像が、蛇行する線状であったり、上下左右に不規則に複数回方向を変えて繋がっている場合には、読み取りエラーが発生することがある。そこで、縦横 2 方向の多重ラベリングを行いこの問題を解消した。ただし、斜め方向だけに繋がっている場合は同一対象物とはしないことにした。

② ノイズ除去処理

目視で雨滴と確認できる最小の大きさは 0.2～0.3mm φ 程度であった。そこで、撮影した画像より 0.3mm φ 程度の雨滴を抽出し、直径方向の Pixel 数を計測すると約 20dots であったので、直径 20dots 以下の雨滴をグレー処理やラベリン

グ処理で計測しなかった斜め方向のノイズと解釈し、これらのデータを削除することにした。結果を図 4 に示した。

さらにアセンブラの部分的導入、定型処理の関数化、Windows API を組み合わせて処理速度の高速化を試みた。実験には、プロトタイプ開発時に使用した雨滴画像と直径の異なる 2 種類のステンレス球を同一条件で撮影した画像を利用した。

表 1 に、ラベリング処理とノイズ除去処理および処理内容の関数化などによるシステム改善の結果を示した。検出率の平均は96%以上であり、計測時間も 3 種類の計測で 3 秒以下に改善されたことから、開発初期の目的は達成できたと考えている。しかし、アルゴリズムの改良により処理速度の高速化が期待できる部分や、被対象物の大きさに依存している部分の改良は今後の課題である。

(3) Exif 情報の読みとり

被対象物の実寸を算出するためには、撮影した画像よりいくつかの撮影条件を読み出す必要がある。機種にもよるが、市販されている最新のデジ

図 4 ノイズ除去処理の結果

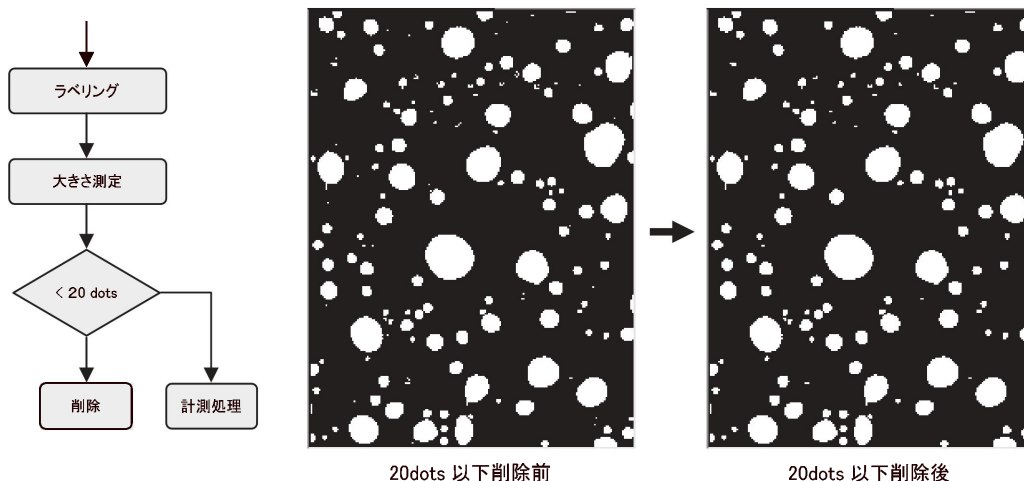


表 1 検出率と計測時間の目視と本計測システムでの比較（雨滴、ステンレス球の個数はいずれも90球）

	雨滴（90滴）	4mm φ ステンレス球	1mm φ ステンレス球
検出率	96%	97.5%	96.5%
計測時間	2.96sec	1.42sec	1.07sec

タルカメラで撮影した画像には、画像以外に露出時間や撮影日になどを含め、約100件程度の撮影時の情報が Exif として記録されている。

そこで、Exif に記録されている情報から、被対象物の実寸算出に必要な画像のサイズ、撮影時の焦点距離と被対象物までの距離を読み出すことを試みた⁽¹⁶⁾。しかし、これらの情報は非公開なので、バイナリデータとして読みとった画像情報から Exif 領域のポインタ値を抽出し算出した。結果の一部を図5に示した。

図5 Exif Tag の抽出例

Exif Tag	値
メーカー名	CASIO COMPUTER CO.,LTD.
モデル名	EX-FH25
画像の幅の解像度	72
画像の高さの解像度	72
ISO感度	200
Exifバージョン	2.21
フラッシュ	発光禁止
色空間情報	sRGB
実効画像幅	3648
実効画像高さ	2736
ホワイトバランス	自動
露出時間	1/80
F値	F3.4
画像圧縮モード	5.3 bit/pixel
レンズ焦点距離	10.1 mm
被写体までの距離	6.2 cm
画質	Fine
シャープネス	標準
コントラスト	標準
彩度	標準
カラーモード	標準
Enhancement	オフ
フィルター	オフ
圧縮種類	JPEG圧縮

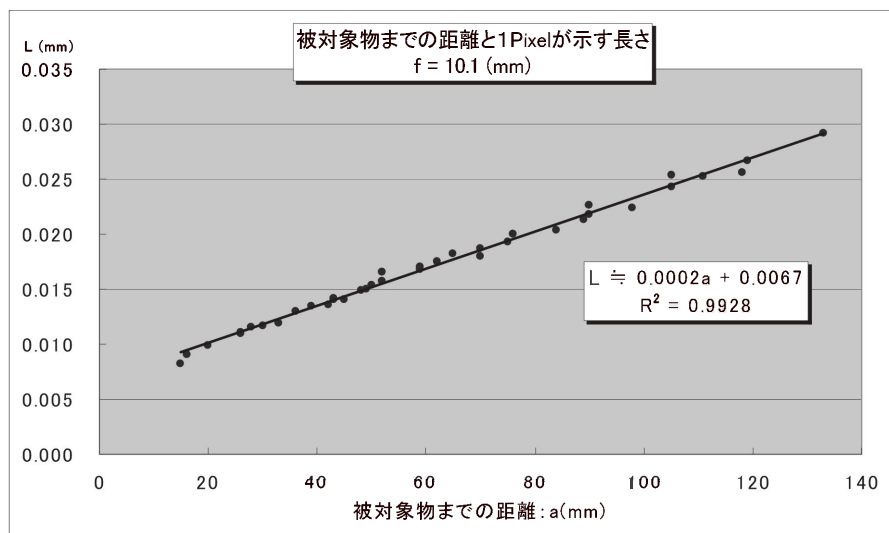
(4) 標準スケールの作成

画像から被対象物の実寸を算出するためには、デジタルカメラから被対象物までの距離、画像上での被対象物の示す Pixel 数、撮影時のデジタルカメラの焦点距離、その焦点距離での 1-Pixel が示す実寸が必要である。しかし、デジタルカメラに搭載されているズームレンズの撮影時における焦点距離を実測する手段がないので、撮影時に表示される情報もしくは抽出した Exif 情報を用いた。同様に、被対象物までの距離も Exif 情報の値を用いることにした。

次の、標準スケールを作成するために、ステレンス製の標準被測定物とデジタルカメラとの距離を変えて撮影をした画像から被測定物の示す Pixel 数を計測した。なお、ズームレンズには遊びがあるため、焦点距離を変える場合は、長焦点距離側から短焦点距離側へ一定方向に移動した。

図6は、被対象物までの距離を無作為に40点選び、使用頻度の高い焦点距離 $f=10.1\text{mm}$ で撮影した結果を、横軸に被対象物までの距離 $a(\text{mm})$ 、縦軸に 1-Pixel が示す実寸 $L(\text{mm})$ を表したものである。この結果、被対象物までの距離との間には線形関係が成り立つことから、(1)式を被対象物までの距離から被対象物の実寸を算出する標準スケールとして用いることにした。

図6 被対象物までの距離と 1-Pixel が示す長さとの関係



$$L = 1.84 \cdot 10^{-4} \cdot a + 6.7 \cdot 10^{-3} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ズームレンズは複合レンズであるが、次の単レンズの2式で近似した。

$$\begin{aligned} 1/f &= 1/a + 1/b \\ a : x &= b : y \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

- f：焦点距離
- a：被対象物からレンズまでの距離
- b：レンズから撮像素子までの距離
- x：被対象物の実寸
- y：被対象物の撮像素子上での長さ

(2)式より、被対象物の実寸は次式のように表わすことができ、さらに(1)式の標準スケールと被対象物が示す画像上での Pixel数 N_p を用いると、被対象物の実寸を算出することができる。

$$\begin{aligned} x &= y \cdot (a-f)/f \\ x &= N_p \cdot L \cdot (a-f)/f \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

§ 6. 大きさ測定への応用

本システムを用い、4mmφと1mmφのステンレス球（90個）の直径を計測した結果を表2に示した。

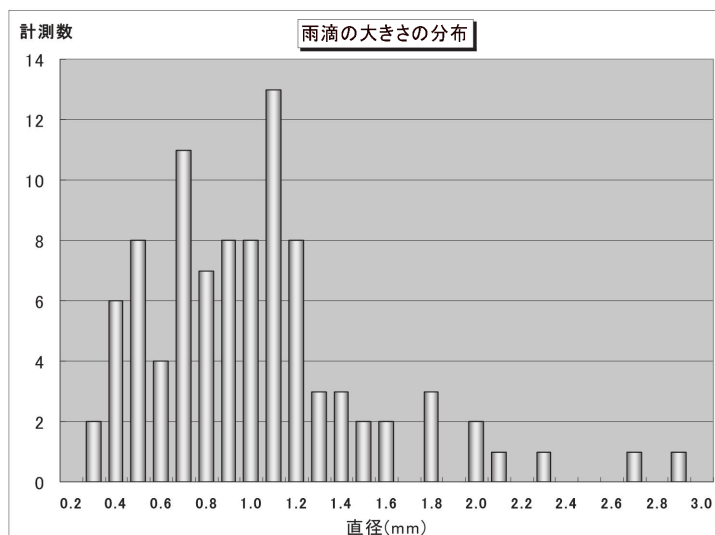
相対誤差は、それぞれ2.8%と2.0%であった。また、表面反射がある球体でも誤差3%程度で測定できたことから、実用レベルのシステムが試作できたと思われる。そこで、本システムを用いて現実的なサンプルとして雨滴の大きさ分布を調べた。

適度な雨滴数を確保するために、降り始めのころの雨滴を測定用シートに約1分間採取した画像を使用した。計測時間は、0.7secであり、図7がその結果である。雨滴が測定用シートに付着した時に潰れるため、その形状が正しく維持されていないと考えられるが、直径0.6mmから1.2mmの雨滴が多く分布している様子がうかがえる。この結果、形状が異なる透明の被対象物の数と大きさをほぼ1秒以内で計測することが可能となり、開発当初の目的が達成できたと考えている。

表2 本システムによるステンレス球の直径の測定結果

	4mmφ	1mmφ
大きさ	3.98mm±0.11	0.99mm±0.02

図7 雨滴の大きさ分布例



§ 7. 今後の改良

デジタルカメラと PC を組み合わせた計測システムの開発目標は達成できたが、実用化を進めるには問題点が2つある。1つは可搬性の向上であり、2つ目は検出速度と検出精度の改善である。そこで、この問題点を解決するための試案を以下に示す。

(1) 可搬性を向上させる試み

プロトタイプ1での画像情報は SD カードの受け渡しで行ったので、かなり不便である。そこで、可搬性を向上させる試みを検討した。なお、矢印は情報伝達系を示す。

• System 1: デジタルカメラ → USB → PC

撮影後 USB ケーブルで PC と接続し、画像を保存しているフォルダを PC から操作し画像を PC に転送する最も簡易なシステムである。この方法では、新しい機材の追加は不要であるが、USB ケーブルでの接続であるため、PC とケーブル接続が可能な距離でのみ使用可能となり活用範囲が限定され可搬性は低い。

• System 2: デジタルカメラ → Bluetooth → PC

Bluetooth を搭載しているデジタルカメラであれば、PC に初期設定することでネットワーク化が可能であり、ケーブル接続や SD カードによる受け渡しの煩雑さから開放される。また、一定時間間隔で保存用フォルダをチェックし、新着ファイルがあれば画像処理を実行することで、全自動化処理も可能である。しかし、この方法も Bluetooth の通信範囲である 10m~100m に限られるので可搬性は低く、また、デジタルカメラに外部接続ができる Bluetooth アダプタが市販されていないので、現在のところデジタルカメラ内蔵で活用できる方法である。

• System 3: デジタルカメラ → WiFi → PC

WiFi を搭載しているデジタルカメラであれば、PC に初期設定することでネットワーク化

が可能であるが、WiFi の通信圏内に限られるため、可搬性は Bluetooth と同様に低い。

• System 4: デジタルカメラ → WiFi → スマートフォン → PC → スマートフォン

WiFi 機能非搭載のデジタルカメラに、WiFi 機能を内蔵した Eye-FiTM などのメモリーカードを装着することにより、スマートフォンの通信圏内であれば、可搬性に優れた双方向のデータ通信が可能なシステムが構築できる。しかし、システム構成は複雑であり、数回の情報転送が必要になるので、専用のアプリケーションの開発が必要である。

以上のことから、可搬性を改善するために、WiFi ネットワークを活用する System 4 が最適と判断し、プロトタイプの仕様を次のように決めた。

- ① デジタルカメラからスマートフォンまで画像転送は、初期設定のみで完了するものとする。
- ② スマートフォンから PC に画像転送する時に、ファイル名に大きさ計測や数量計測などの処理識別コードをつけ、メール添付型で画像ファイルと Exif 情報を送信する。
- ③ Outlook 等のメーラーで受信した後、処理識別コードにより以降の処理を仕分ける。そのための送受信アプリケーションを開発する。
- ④ 個数のみの計測であるのならばスマートフォン単体でも可能であるので、スマートフォン用アプリケーションを開発する。

(2) 検出精度の向上と処理速度の改善

被対象物が重なり合っている場合は検出精度が低下するので、このような場合の処理アルゴリズムの開発が必要である。また、被対象物の境界が不鮮明な場合や境界の一部が薄くなっている場合にも検出精度が低下するので、被対象物の形状を

補完処理するアルゴリズムの開発も必要になる。

一方、距離測定の精度の改善も不可欠な要素である。現状では、Exif に記録されている有効数字 2 ～ 3 桁の情報を使用しているが、その精度には限界がある。撮影と同時に距離も正確に計測できる新しく開発された C-MOS センサに期待したい。

また、本論文では測定シートの素材は透明の素材を使用した。背景と被対象物とのコントラスト比を上げるために、有色のシートも視野に入れ、撥水性和平面性が確保できる高分子フィルムを検討したい。

以上の検討事項を解消し、最終目標である落下中の雨滴がリアルタイムで計測可能なシステムに改良を試みる予定である。

参考文献

- (1) 「映像計測システム」〈<http://www.ipros.jp/adv/05450/>〉(20100810)
- (2) 「大きさ測定システム」〈<http://www.gazokeisoku.co.jp/seihin.html>〉(20100810)
- (3) 「大きさ測定システム」〈http://www.yanmar.co.jp/products/agri/greensystem/fruit_sorting/inspection_system/quality/index.htm〉(20100810)
- (4) 「大きさ測定システム」〈<http://job.rikunabi.com/2012/company/top/r648300013/>〉(20100810)
- (5) 「小型ハイスピードカメラ」〈<http://analysis.nacinc.jp/>〉(20100810)
- (6) 「小型ハイスピードカメラ」〈<http://analysis.nacinc.jp/products/hsc/uvi/system.html>〉(20100810)
- (7) 「雨滴の最終落下速度」〈<http://www5b.biglobe.ne.jp/~saturn/meteorology/04.htm>〉(20100810)
- (8) 谷尻豊寿、『画像処理入門』、技術評論社、1996、pp. 28-174
- (9) 河西朝雄、『Visual BASIC for Windows』、ナツメ社、1994、pp. 10-274
- (10) 布留川英一、『WILLCOM』、MYCOM、2006、pp. 21-260
- (11) 金藤仁、『自動計測のための VB6』、技術評論社、2002、pp. 93-269
- (12) 上岡勇人、『VisualBASIC2008アプリケーション開発』、日経 BP、2008、pp. 17-68、pp. 261-324
- (13) 川口輝久、河野勉、『Visual BASIC』、技術評論社、2005、pp. 10-274
- (14) 日経編集局、『日経ソフトウェア 2月号』、日経 BP、2010-21、pp. 16-153
- (15) 笹田仁、『日経ソフトウェア 11月号』、日経 BP、2008-11、pp. 28-145
- (16) 「Exif の Tag」、〈<http://cachu.xrea.jp/perl/ExifTAG.html>〉(20100810)
- (17) 「Eye-Fi Memory Card」、〈<http://www.eyefi.co.jp/>〉(20100810)