

重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化

その2 バグの移動速度検定と自動追跡手法の開発

A VISUALIZATION OF AIR CURRENT BY USAGE OF BALLOONS FOR GRAVITY-FREE

Part 2 Wind channel test to examine velocity of balloons and automatic method to track balloons in pictures

森 太郎 ——*1 小西崇永 ——*2
絵内正道 ——*3 羽山広文 ——*4

Taro MORI ——*1 Takahisa KONISHI ——*2
Masamichi ENAI ——*3 Hirohumi HAYAMA ——*4

キーワード：
気流測定, 可視化, 風洞実験, 自動追跡

Keywords:
Velocimetry, Visualization, Wind channel test, Automatic algorithm to track balloons in picture

In this report, the two subjects for elevating the availability of this method were discussed.

(1) The velocity of balloons by the wind channel test was examined to evaluate accuracy of the measurement. It can be seen that the velocity of balloons was in direct proportion to the air velocity in wind channel, the inclinations of correlation line were more than 0.8; and the correlation coefficients were more than 0.9.

(2) The automatic algorithm to track balloons in pictures was developed to ease the operation of the measurement. And the algorithm was useful as speed and accuracy.

1. 研究の目的

大規模な屋内空間（アトリウム、ドーム、屋内体育館等）では、建築環境計画や維持・管理の際に環境測定の結果に基づいた合理的な判断が必要となる。特に気流動に関する情報については、CFD（Computer Fluid Dynamics）が計画時に用いられ、気流を利用した環境調整手法が頻繁に提案されているが、その効果の確認を行った実測調査資料が不十分な状況にある。この原因としては、空間内の気流動が大規模且つ三次元的であるため、現状の代表的な気流分布測定法である風向風速計の使用が難しく、また白煙などによる気流の可視化も、実使用時への適用や、有意なデータを取るための定量的な測定に難点があることが挙げられる。

この状況を踏まえ、一連の研究^{*1}では、魚眼レンズを装着した数台のデジタルビデオカメラから得られる浮遊気球（バグ）の移動画像の解析から、大空間内の気流動を空間全域にわたって簡易且つ三次元的に測定する手法の開発を行っている。本報告では、今後、この測定手法の汎用性を高めるためにクリアしなければならないと思われる二つの課題、①測定精度、②測定手法の省力化に関する問題、についての検討結果を示している。

2. バグ（気流トレーサー）の移動速度とその検定

2.1 バグの概要

気流のトレーサーとして開発したバグの一例を図1に示す。作成を容易にするためと、輻射・周囲温度・流れ等による影響を等方的に受けるようにするため正四面体とした。また、気流内のHeガスと周辺の空気の温度差から起きる密度変化が気球自体の浮力に影響を

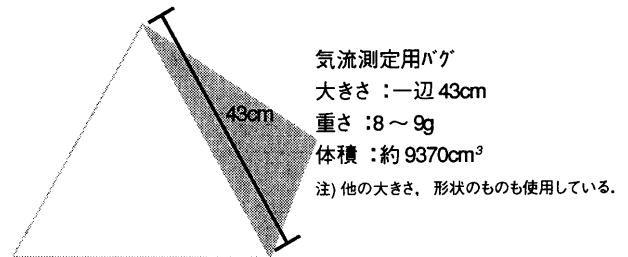
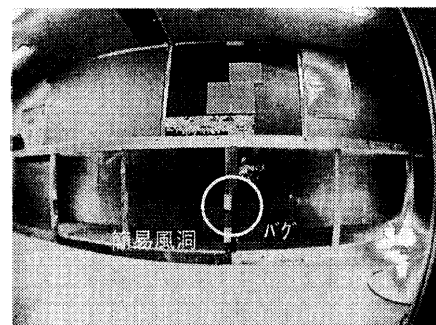


図1 通常使用しているバグの構成



大きさ: 断面: 900mm × 900mm(内寸), 流れ方向: 9000mm
構成材料: 合板(5.5mm厚), 一部7mm板製(カメラによる撮影を可能にするため)隙間にシコンを充填(気密性確保)
送風機: 内径42cmの有圧ファン(出力は、単相リキタ式電力調節器を用いて電力を調節)
整流格子: 合板製(2.5mm厚, 50mm × 50mm × 200mm[流れ方向]): 風路の前後に挿入

図2 速度検定用簡易風洞の構成

*1 北海道大学大学院工学研究科 助手・博士(工学)
(〒060-0828 札幌市北区北13条西8丁目
北海道大学工学部建築環境学分野)
*2 北海道大学大学院工学研究科 大学院生
*3 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博
*4 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

*1 Instructor, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.

*3 Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*4 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

与えるのを避けるため、バッグには He ガスを未膨張状態に充填した。素材は、ガスバリアー性を持つエチレン・ビニルアルコール共重合樹脂にアルミニウムを蒸着したものを使用し、バルーンへの輻射の影響軽減に配慮している。

2.2 バグの移動速度の検定

前回の報告²⁾では、バッグの移動軌跡を追跡することで、対象気流場の概観を表現することができる事を示した。本報告では、避けて通れないもう一つの問題として、「バッグの移動速度と気流速が一致しているのか？」という測定精度の問題を取り扱う。この問題には二つの側面があると考えられる。一つは a) 等速度運動時の移動速度は気流速を表しているのか、という問題。もう一つは b) 等速度運動に至るまでの遅れ時間がどの程度あるのかという問題である。PIV (Particle Image Velocimetry) 等の気流の可視化測定法では、大きさが 1 ~ 数 100 [μm] の粒子をトレーサーとして利用し、画像のサンプリング間隔も短いのでトレーサーの動き=流体の動きとすることができる⁹⁾したがって、上記のような問題は生じないが、本測定法のように大型のトレーサーを用いる場合、移動中のトレーサーにかかる風圧の分布が複雑になり、それに伴ってトレーサー自体が複雑な動きをするため、両者とも検討を要する項目となる。

大きなトレーサーと気流の関数を示す文献には小泉⁹⁾によるものや桑名⁷⁾、伊勢⁸⁾、角⁹⁾、今井¹⁰⁾によるものなどがある。主に気象学分野の文献であり、大きなトレーサーは、遅れ時間を考慮して解析を行わなければならないとしている。但し、本測定法が対象としているのは室内の気流場であり、上記の研究と比較すると、流れ場の速度は非常に遅く、簡単に移動速度=気流速としても問題が生じない可能性もある。

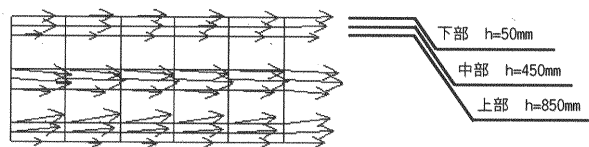
本報告では、上記 a) に関する検討として、1 [m/s] 以下の低速の定常流の下で、バッグの移動速度の検定 (超音波式風速計の値とバッグ

の移動速度を比較) を行う。検定に用いた簡易風洞の写真とその構成表を図 2 に示す。風洞の内部の気流に大きな乱れや回転が加わっていると検定が困難になるため、風洞は、吸込み型とし、風路の両端に整流格子を設けた。検定用の風速計には超音波風速計を用いた。風路内の測定点は流れ方向に 2.7 [m] 地点から 0.9 [m] 毎に 6 点、観察面、床面から 0.05 [m], 0.45 [m], 0.85 [m] に測定点を設定し、合計 54 点で計測した。各測定点につき風速を 1 秒毎に 30 回測定し、その平均値を気流速の代表値とした。次節で説明するグラフ (図 4 ~ 図 9) の横軸の値はこれらの平均値を風洞内の風速測定点、全 54 点で平均した値である。

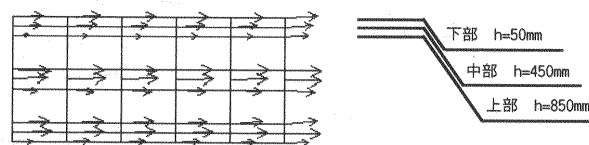
実験の設定条件を表 1 に示す。検討項目は気流速、バッグの形状と大きさとした。図 3 に気流速を変化させた場合の風洞内の気流速分布

表 1 実験の設定条件

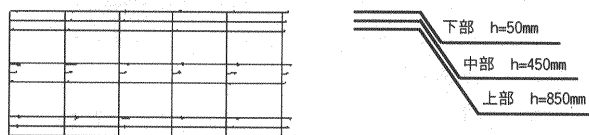
ケース	気流速(出力)	バッグ形状	バッグの大きさ
CASE1	30%	四面体型	30cm
CASE2			43cm
CASE3			60cm
CASE4		立方体型	20cm
CASE5			30cm
CASE6	60%	四面体型	30cm
CASE7			43cm
CASE8			60cm
CASE9		立方体型	20cm
CASE10			30cm
CASE11	100%	四面体型	30cm
CASE12			43cm
CASE13			60cm
CASE14		立方体型	20cm
CASE15			30cm



ケース	平均	上部	中央部	下部
Fast 出力100%	0.86	0.70	0.94	0.95



ケース	平均	上部	中央部	下部
Middle 出力60%	0.57	0.45	0.63	0.64



ケース	平均	上部	中央部	下部
Slow 出力30%	0.13	0.08	0.13	0.19

図 3 各出力の風速値の概要 (m/s)

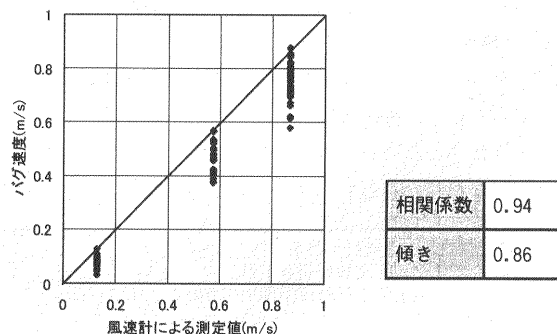
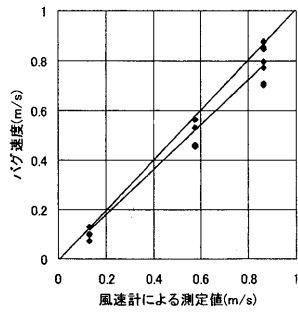
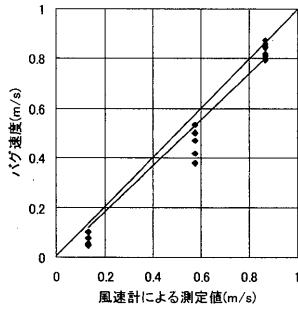


図 4 気流速と全バッグの移流速度の相関図



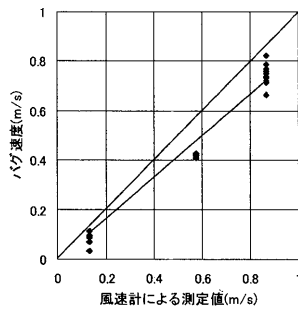
相関係数	0.97
傾き	0.90

図5 正四面体型 30 [cm] の相関図



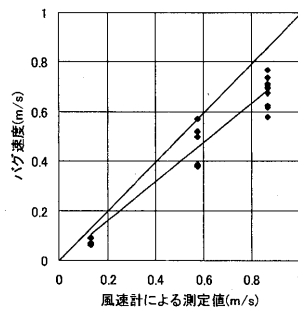
相関係数	0.97
傾き	0.93

図6 正四面体型 43 [cm] の相関図



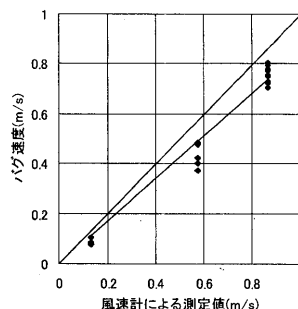
相関係数	0.97
傾き	0.84

図7 正四面体型 60 [cm] の相関図



相関係数	0.93
傾き	0.79

図8 立方体型 20 [cm] の相関図



相関係数	0.96
傾き	0.85

図9 立方体型 30 [cm] の相関図

を示す。自作の風洞のため十分な大きさがとれず、中心付近の風速が他の部分よりも多少速くなっているが、おおよそ一定の流れが形成されている。

形状については、飛行の様子や飛行軌跡に対する等方性の影響を把握するために、四面体型と立方体型について実験を行った。

大きさについては、流れ場の規模と追随性の間に関係があると考えられるので、四面体型で3ケース。立方体型で2ケースの実験を行った。一般的に大きさが小さく、比重量が空気に近いトレーサーほど気流場に対する追随性が良いと考えられるが、ここに示した立方体型の20 [cm]、正四面体型の30 [cm] という大きさは、容積と重量の関係から He によって空気と中立する浮力を得るための最小の大きさとなっている。

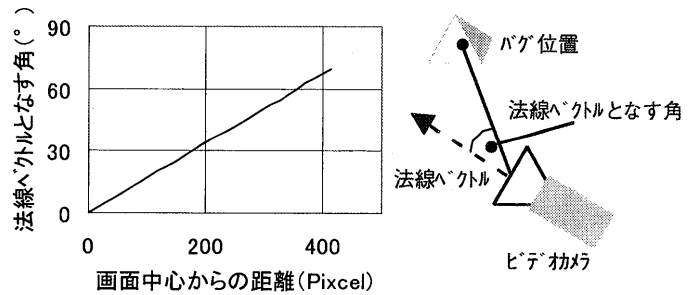


図10 画像中心からの距離と法線ベクトルとなす角の関係

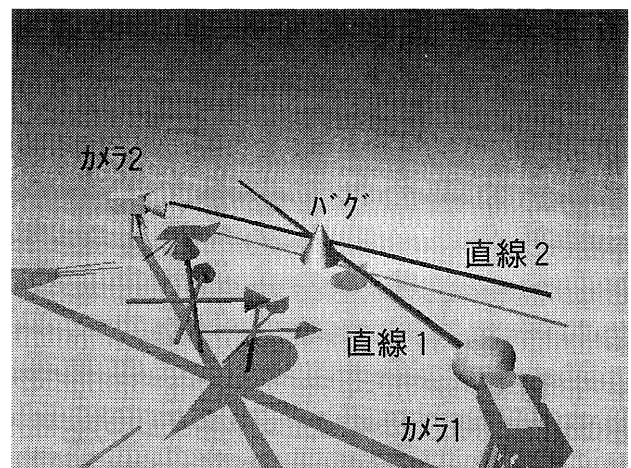


図11 可視化測定法の概要

2.3 検定結果と考察

図4に気流速の計測値と全バグの速度の相関図を示す。これを見ると、全体的に二つの測定値の相関はかなり高く、バグの移動速度はこの風洞内の気流速を比較的よく表している。しかし詳しくみると、風速が速くなるほど、バグ速度が風速計値よりやや低い方向にばらつく傾向がある。図5～図9に計測値と各バグ毎の相関図を示す。これらの図からバグの形状の影響を抽出すると、立方体型のほうがやや回帰直線の傾きが低く、風洞内の風速を捉えきれていないことがわかる。四面体型が一頂点を下にし、安定して飛行するのに対し、今回の実験では立方体型は重心と各頂点の重量のバランスによって、回転が多くなっているのが実験中の観察から確認できた。

次にバグの大きさの影響を見るために四面体型に注目すると、43cmの回帰直線の傾きが最も1に近い。これは、風洞内の流れ場と

バグの大きさ、重量のバランスが適当であったためと考えられる。

一方、正四面体型30cmや立方体型20cmのように小さいバグは他のバグに比べ、測定結果が上下にばらつく傾向がある。小さいバグの場合、中心付近を安定して飛行させることが難しく、このため壁付近の速度の遅い流れの影響を受け、移動速度が低めにでてしまったことが原因と考えられる。逆に60cmの大きなバグでは、重量や大きさの影響（速度分布の全体をとりすぎたため、結果として壁近傍の低速域の影響を受け、バグ速度が遅くなってしまう）で回帰直線の傾きが小さくなったと考えられる。以上の結果をまとめると、

- ① 空調吹出し口付近の乱れた様子やバグの大きさより細い幅の熱対流を観察することは難しい。
- ② バグの形状は、なるべく安定して飛行するものが選択されるべきである。大きさは、様々な流れ場を測定対象としたい場合には、なるべく小さいほうがよいが、安定飛行を考えると多少大きめのほうが好ましい。
- ③ 本測定法で対象とするアトリウムなどの大空間内で卓越した気流は、バグのスケールを超える規模のものが多いと考えられる。したがって、本手法によって得られた気流速データを設計や管理・運営の際の参考データとして用いても問題は生じない。

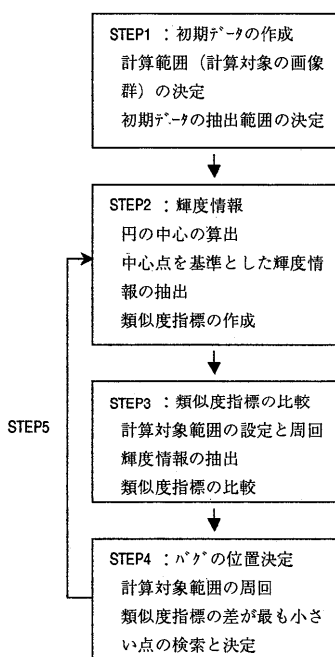


図12 計算のフロー図

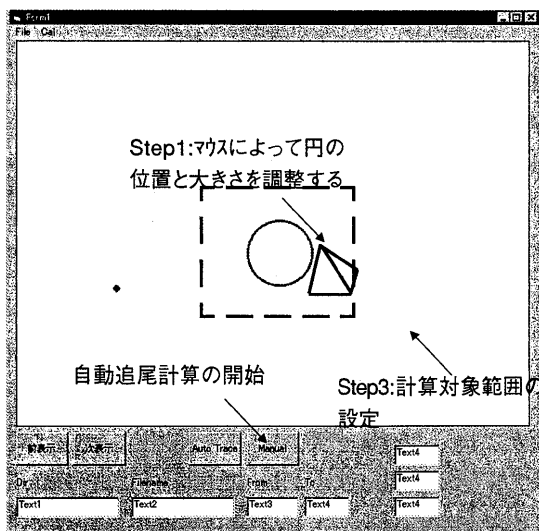


図13 データの抽出方法

3. バグの自動追跡による測定の省力化

3.1 バグの位置の推定方法の概要

図10に示すように魚眼レンズで撮影した画像は、画像中心からの距離と、対象物(トレーサー)とカメラの中心を結ぶ線がカメラの法線ベクトルとなす角とが比例の関係を持っている。この性質がバグの三次元位置を推定するための基本的な骨子となっている。この性質を利用すると、画像内のトレーサーの位置情報(X, Y座標)から、カメラ中心とトレーサーを結ぶ直線のベクトル成分V₁は式(1)のように導くことができる。

$$V_1 = \left(\frac{x_1}{D_1}, \frac{y_1}{D_1}, \frac{1}{\tan \theta} \right), \left(\frac{x_1}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{D_1} \right)^2 = 1$$

$$D_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$$

$$\theta = \frac{D_1}{D_{\max}} \theta_{\max} \dots \dots \dots (1)$$

- x₁, y₁: サンプルされた x, y 座標
- D_{max}: 画像の対角線距離 (PIXCEL)
- θ_{max}: セミフィッシュアイレンズ^(*)の最大角度

したがって図11のようにすくなくとも二台のカメラがあればトレーサーを通る二本の直線を確定でき、測定空間内で二本の直線が交わる点をトレーサーの位置とすることができる。実際には誤差が生じるため二本の直線が交わることはなく、最も近接した点の中点をバグの位置と仮定している¹⁾。

3.2 位置の推定の際の問題点

本測定法は、空間中心部の気流を測定するために風速計設置用の足場を組んだり、白煙を使用するために火災報知器の調整を行う等の作業をする必要がないため、実使用状態の空間を測定する際に、全域に渡って、簡易に気流動の測定を行うことができる。しかし、現状ではバグの飛行軌跡のサンプリングを手作業(Δt秒毎の画像におけるサンプリングのためのクリック)に頼っているため、かなりの手間と時間を要する。また作業が煩雑になるため一度にひとつの

バグしか撮影できず、空間の全域を撮影するのに時間がかかる等の問題が生じている。この作業を自動化、簡易化できれば、より多くのデータを処理でき、より簡便で汎用性の高い測定法とすることができる。

3.3 既往の測定方法との違い

可視化画像データから気流分布を求める方法としては前出の PIV が代表的な手法である。PIV に分類される中でも画像の解析方法は数種類あり、たとえばポピュラーな解析方法のひとつである自己相関法ではデジタル化した画像に FFT を施し、その主要な周波数と

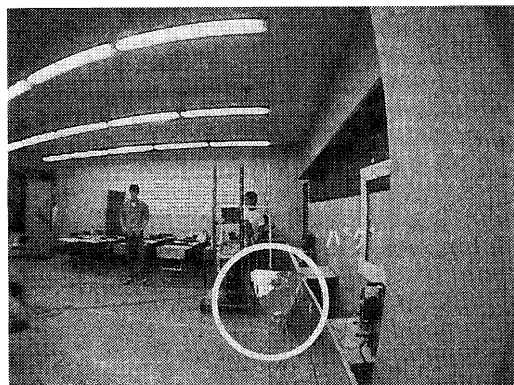


図14 適用対象

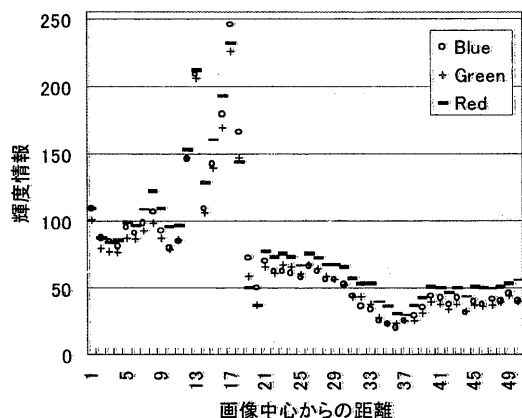


図15 抽出した輝度データ

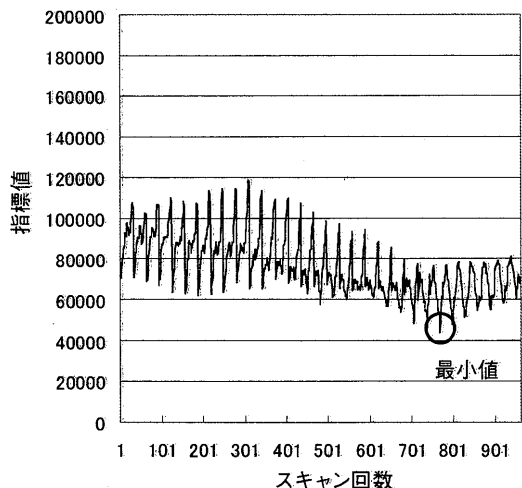


図16 判定指標

位相情報から自己相関の高い位置を定めている⁹⁾。本測定法では空間内に浮遊するトレーサーは多くても数個で、画像のサンプリング間隔も長い。また PIV のような実験空間ではなく、実使用されている空間なので様々な背景の中からバグを抽出しなければならないため独自の自動追跡手法が必要となった。

3.4 バグ画像の特徴の抽出

本測定法に用いている画像データはサイズが 640×320 [PIXEL] の 24bit WINDOWS BITMAP と呼ばれている。このデータは横 640、縦 320 個のデータセットを持っていて、そのデータセットの中身は青、緑、赤毎に 256 個 (0-255) の輝度情報である。このデータを使用して画像内のバグを検出するために、「バグは同じような輝度情報の分布を持ちつづける。」という特徴を利用し類似度の指標を作成した¹⁰⁾。バグは煙のように形状や性質が変化するトレーサーではないので多くの場合、初期データの輝度情報が大きく変化することはないからである。

3.5 自動追跡アルゴリズムのフロー

図 12 に自動追跡のアルゴリズムのフロー図を示す。

STEP1: 初期データの位置と大きさの指定

図 13 のようなソフトを Visual Basic で開発した。作業はまずスクリーン中の円をバグの位置と大きさに合うようにマウスによって調整する。この円の内部が初期データの抽出範囲となり、この情報を元に STEP2, STEP3 の作業を行っていくことになる。

STEP2: 輝度情報の抽出

輝度情報の抽出範囲を図 13 に示す。この円で表される範囲は STEP1 で指定した大きさに当たる情報である。但し、この円の中全

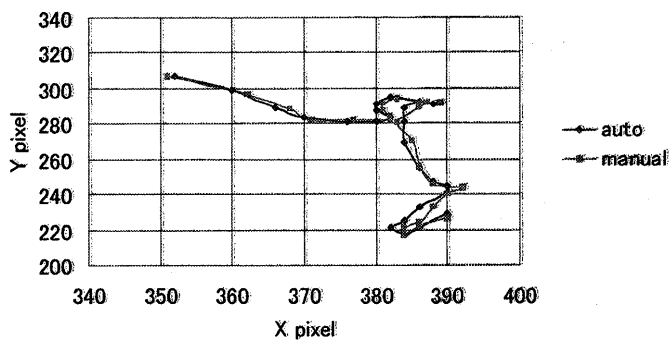


図17 画面上のバグの位置

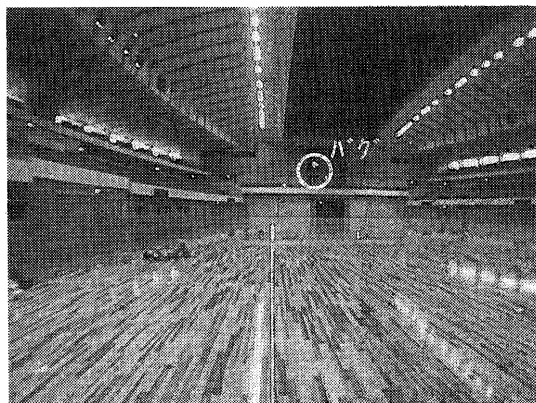


図18 適用例

てにわたって情報を抽出するとデータが大量で処理に時間がかかる。したがって本測定法ではこの円の中心から縁に向かって放射状に線を10本引き、その線を50等分した点において輝度の情報を抽出することにした。抽出した情報は下記のように円中心からの距離と36°ごとの回転角によって配列を作成し、メモリ上に保管する。

$color(L, \theta)$, $color$, 色情報, L : 中心からの距離, θ : 回転角
STEP3, 4: 類似度指標の比較とバグの位置の決定

STEP2で抽出した現在の画像(画像1)におけるバグの輝度情報を $Red_1(L, \theta)$, $Green_1(L, \theta)$, $Blue_1(L, \theta)$ とする。追跡対象の画像(画像2)に現在の画像のバグの中心を基準に十分広い計算範囲を設定し、その座標1PIXELごとにSTEP1と全く同じ情報の抽出作業を行う。そのときの輝度情報を $Red_2(L, \theta)$, $Green_2(L, \theta)$, $Blue_2(L, \theta)$ とする。追跡対象の画像におけるバグの位置の判定指標となるのは(2)式に示す Resemblance (類似度) で、画像1と画像2における同じ場所の輝度情報に減算を施し、その残差の絶対値の積算をしたものである。

$$\begin{aligned} Resemblance = & \sum |Red_1(L, \theta) - Red_2(L, \theta)| \\ & + \sum |Green_1(L, \theta) - Green_2(L, \theta)| \dots\dots\dots(2) \\ & + \sum |Blue_1(L, \theta) - Blue_2(L, \theta)| \end{aligned}$$

両者の情報が似通っていれば判定指標の値は小さくなる。計算範囲内で判定指標の値が最も小さくなった点を追跡対象画像におけるバグの位置とする。

STEP5: 繰り返し

STEP3, 4の作業を逐次繰り返し、次々にバグの位置決定を行っていく。

3.6 適用結果

図14~16に上記の作業の適用結果を示す。図14に示す画像を元に5秒後の画像に対し本手法を適用させた結果、適正な位置に解答が得られた。図15は抽出されたデータの一部、図16は判定指標の動きである。丸で囲んだ部分で最小値が出現した。

次に連続した画像を用いた場合について考察する。図17はバグを撮影した画像をコンピューターに1秒毎に取り込み、各画像内におけるバグの位置を特定したものである。図18にデータのサンプリングを行った一連の画像の中の一枚を示す。図17は手作業の場合との比較も行っており、両者は概ね一致している。手作業と自動の場合でバグの場所が一致しない箇所は、手作業の際に生じる誤差と考えられる。前後の画像中のバグの位置が非常に接近している(気流動がわずかな状態)場合、手作業では、微妙な調整が必要となり、トレースがやや不自然になる。また図17の例で解析に要した時間を比較すると、手作業で120秒、自動追跡84秒であった(CPU550Mhzのコンピューターを使用)。今後のコンピューター性能の向上や、手作業による疲労→スピードダウンなども考慮すると、処理速度の向上が見込まれる。但し、すべてのケースではなく背景の状況(背景色の急激な変化やバグと同系色上での追跡)によっては失敗する場合もある。今後のより精度の高いアルゴリズム開発が必要である。

4. まとめ

自由浮遊バグを利用した気流測定手法の汎用性を高めるために自由浮遊バグの移動速度の検定と省力化に向けたバグ画像の自動追跡手法の開発を行い、次のような結果を得た。

- ① 自由浮遊バグの移動速度検定: 空調吹出し口付近の乱れた様子や、バグの大きさより細い幅の熱対流を観察することは難しいが、本測定法で対象としている大空間内で卓越した気流ならば、十分な精度の測定が行える。
- ② 自動追跡手法の開発: 手作業と比較しても十分な精度と速度を持つ自動追跡アルゴリズムを開発した。今後より精度の高い手法の開発を目指していく。

謝辞

本研究はホクサイテック財団(若手研究者奨励助成金)と文部省科学研究費萌芽の研究(課題番号11875120, 代表絵内正道)の研究助成を受けている。記して感謝する。

注1: 本測定システムで使用している魚眼レンズはS社のセミフィッシュアイレンズVCL-0437H(視野角が180°未満のレンズ: 視野角120°)で、射影方式は等距離射影方式である。

注2: 本報告は参考文献2)~4)をまとめたものである。

【参考文献】

- 1) 森 太郎ほか: 重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化, 日本建築学会技術報告集第7号, PP.87-92, 日本建築学会, 1999.2
- 2) 小西崇永ほか: 重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化 その4 簡易風洞による自由浮遊バグの流速検定, 日本建築学会大会学術講演梗概集1999年9月, 環境II pp.509-510
- 3) 小西崇永ほか: 重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化 その6 バグの自動追跡手法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集2000年9月, 環境II pp.537-538
- 4) 小西崇永ほか: 重力に平衡した自由浮遊バグによる気流動の可視化 その7 バグの自動追跡手法の開発とその適用, 日本建築学会北海道支部研究報告集No.73, p.179-182, 2000.7
- 5) 佐賀徹雄ほか: 実践集中講義PIVの要点, 社団法人可視化情報学会
- 6) 小泉俊雄ほか: 立体写真測量を用いた風の観測法, 写真とリモートセンシング Vol.33, No.3, 1994
- 7) 桑名十郎: 高層風観測気球の追従性について, 技術時報No.57, 札幌管区气象台, 1967
- 8) 伊勢貞夫: ラジオゾンデ用気球の放球に関する一考察, 研究時報29巻, 札幌管区气象台, 1977
- 9) 角 俊治: 気球の上昇速度について, 高層気象台集報, 第6巻第2号
- 10) 今井一郎: 気球の上昇速度について, 気象集紙Vol.32, 1957
- 11) 船久保 登: 情報・電子入門シリーズ⑩パターン認識, 共立出版株式会社

[2000年9月19日原稿受理 2001年2月22日採用決定]