

LED を用いた熱風における流速測定装置

徳島大学 創成学習開発センター LED プロジェクト

西村 信耶

山根 北岡 中尾 三好

実験概要

現在の PIV システムは非常に高価である。ローコストに PIV システムを構築するという目的により、本実験では、パワーLED とデジタルカメラを用いて構築された 3D-PIV システムの構築と、2 次元、3 次元の粒子の流速測定を行う。実験の流れとしては、3 色 LED 光のパルス照射が行われる中で粒子を落とし、その様子をカメラで撮影する。得られた画像には、1 枚に数時刻分の粒子の挙動が映っている。画像を単色の画像に画像処理し、撮影時間中の粒子の位置の変位を求める。位置の変位とパルス照射間隔から、粒子の流速を求める。

はじめに

PIV (Particle Image Velocimetry) とは、粒子画像流速測定法である。様々な対象の流れの計測を行う装置である。物理学や工学や医学などで広く活用されている流速測定。画像解析技術である。ファン周辺の気流、タービンの流れ場、自動車エンジン燃料噴霧の流速計測に用いる。機能としては、レーザーを用いて対象を照明し、カメラで粒子などの位置を撮影する。得られた画像を用いて流速計算を行う。速度と方向を求める装置である。具体的には、時間的連続撮影された可視化画像から、微小時間における粒子の変位ベクトルを求め速度ベクトルを推定する方法。画像相関法を用いて、微小時間差を持って記録された 2 画像の差 (微小な粒子群の移動量) からベクトルマップを作る。視るという直観的な計測手法として広く利用されている計測手法である。

一般に知られている PIV はレーザーによるシート光を利用したものである。まず、粒子群にシート光を当て、2 次元平面の中で粒子の流れをとらえる。この時、僅かな時間差で 2 枚の写真を撮影する。撮影時に、フラッシュのようにシート光を照射する。得られた 2 枚の画像に検索窓を設ける。そして、その部分について 2 枚の画像の相互相関を調べる。この結果、粒子の運動の速度成分の解析ができる。近年は、2D ではなく、3D で粒子の流れを調べるトモグラフィック PIV が実用化された。これは、レーザー光を (Not シート光) 粒子群に当て、3 台のカメラで撮影することで 3 次元計測を可能にしたものである。この装置では、粒子群の 3 次元空間における速度 3 成分が解析できる。課題としては、高価なことである。レーザー、複数の CCD カメラなどによりコストがかかる。

目的

本実験では、高コストという課題に対し、コストの安い新しい PIV システムを構築することを目的とする。そこで、パワーLED を用いることにした。レーザー光の代用である。また、カメラについても、デジタルカメラを使用する。よって、LED の用途の拡大を目指すことも実験の目的である。パワーLED やデジタルカメラを用いた PIV システムを構築し、これを用いて粒子を対象に、2D、3D の流速計測を行う。

原理

我々の構築した PIV システムの原理を以下に示す。パワーLED は、RGB の 3 色 LED を使う。これは単色で光らせることが可能である。微小時間の間に、1 色ずつパルス照射する用途で使用する。カメラのフラッシュの役割である。PIV システムの動きを下記に示す。

1. まず LED から緑色の光を照射させておき、粒子を落下させる。この時、同時にカメラのシャッターを開く。
2. 赤、青色の光を粒子群に 1 色ずつ微小時間差を設けて照射する。2 色の照射を行う間、シャッターは開けておく。パルス照射のタイミング例は、図 1 に示す。図 2 は、カメラで撮影できると予測できる画像データの例である。

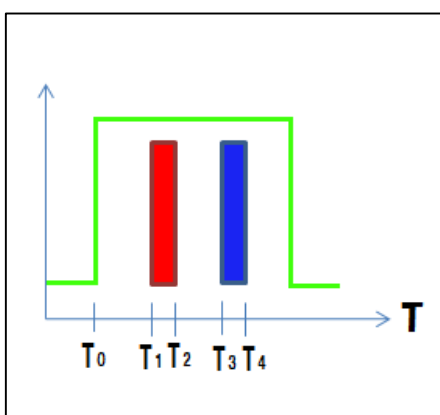


図 1 パルス照射のタイミング例

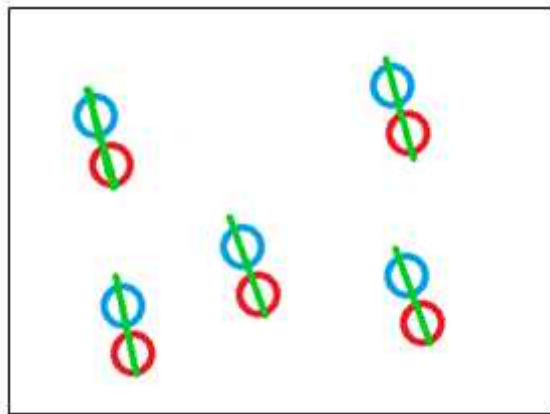


図 2 得られた画像データ例

時々刻々動く粒子は、照明されたタイミングで色が変わっていく。結果的に図 2 のように、1 枚の写真に、数時刻分の粒子の挙動が映る。時刻ごとに、映る色が違う。すなわち、写真から、どの時刻にどの位置にいたかがわかる。また図 2 には、緑の輝線が映る。これは、一つ一つの粒子の軌道を示している。原因としては、緑色を照射した中で、赤、青色をパルス照射したためである。

変位と時間で、粒子の流速が導出できる。流速の導出の流れとしては、画像処理された画像において、検索領域を決める。拡大した領域で変位を求める。得られた変位から速度を計算する。また、粒子の軌跡も計測できている。そこで、得られた速度データと軌跡を用いて速度のベクトルマップを描画する。

ただし今回の実験は原理を検証する実験であり粒子からの光散乱パターンや粒子が受ける抵抗などは厳密に扱っていないものとする。

実験方法と結果

<実験 1 2D 計測>

3D-PIV 計測の前段階として、カメラ 1 台を使用した 2 次元 PIV として実験を行った。この場合、二次元の速度が計測できる。得られた画像は画像解析し、座標を調べ、データを整理する。そして速度を求める。また、輝線から粒子の動きが求まる。

この実験で構築した装置は図 1 回路図は図 2

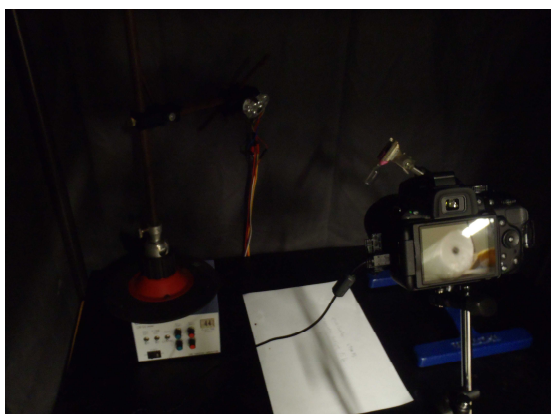


図 1

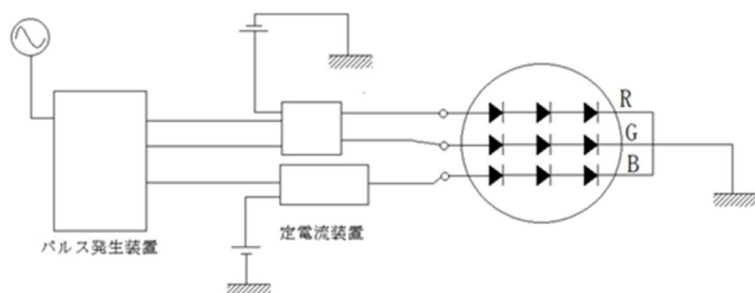


図 2

<使用機器>

カメラ 1 台 (Nikon D5200)

手動シャッター装置 MC-DC2

パルス発生装置



パワーLED



LED 制御装置 2 台



暗室 (縦 100 横 110 高さ 170)

粒子

画像解析ソフト Image J

<実験結果>

得られた画像

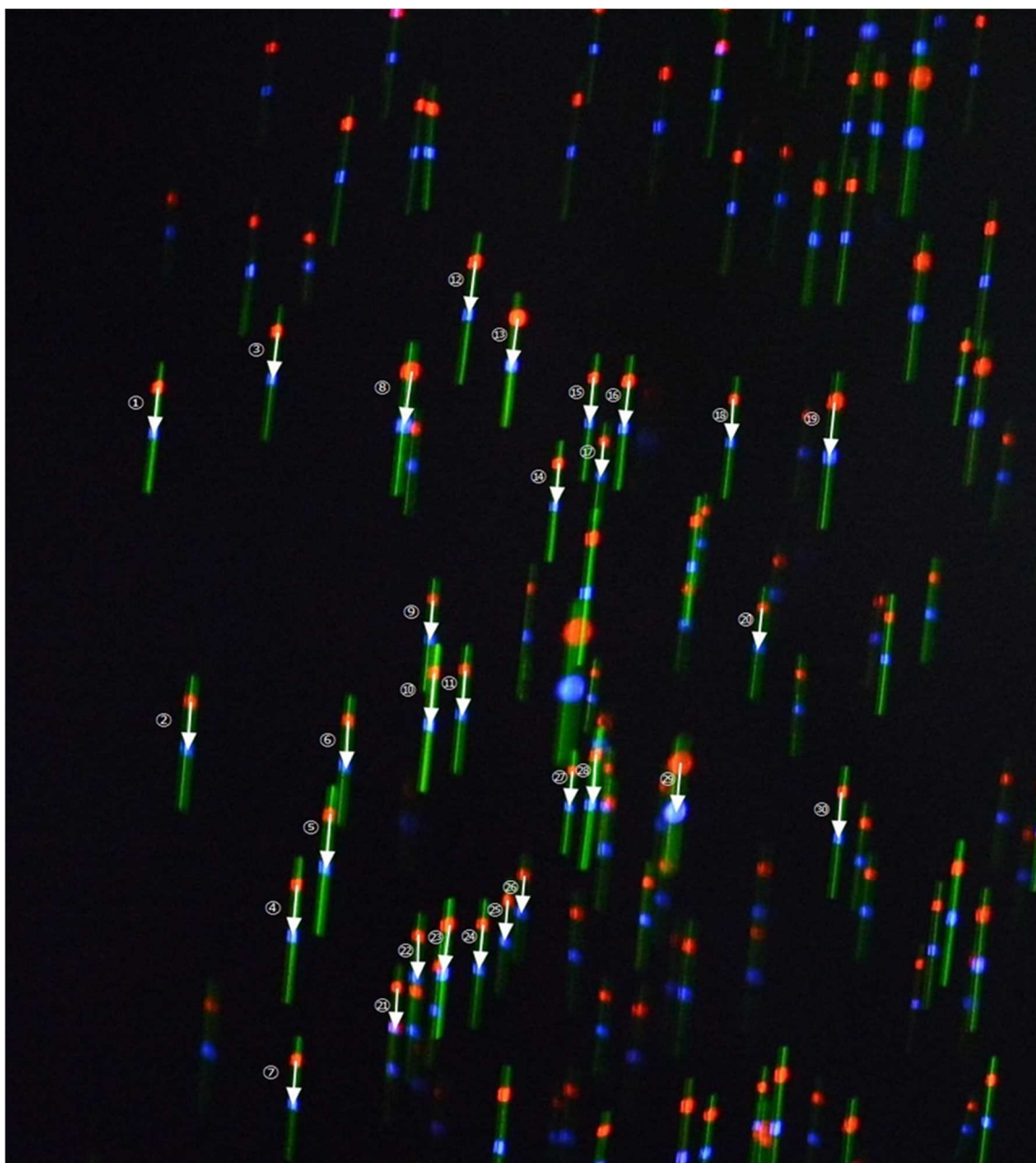


流速測定手順

撮影した画像をもとに Image J を使用し赤の粒子の X と Y についてのピクセルの値を読み次に対となっている青の粒子の X と Y についてのピクセルを読みとる。求めたピクセルからメートル単位に直し流速を測定する。拡大画像には番号が振られておりその番号が速度表と対応している。

・速度 2 成分のデータ、グラフ

計測結果の記述統計量			
	移動ピクセル	移動距離	速度
平均	48.09439131	1.68162	0.84081
中央値	48.16637832	1.684137	0.842069
最小値	37.21558813	1.301243	0.650622
最大値	58.21511831	2.035492	1.017746
標準偏差	5.501168754	0.192348	0.096174
分散	30.26285766	0.036998	0.009249
合計	1442.831739	50.44861	25.22431
データ数	30	30	30



1ピクセル当 たりの長さ [mm]	0.034965		赤X座標	赤Y座標	青X座標	青Y座標	移動ピクセル	移動距離[mm]	速度[m/s]
赤と青の時 間差[ms]	2	1	1791	1974	1787	2022	48.16637832	1.684137418	0.842069
		2	1819	2306	1815	2355	49.16299421	1.718984093	0.859492
		3	1897	1914	1892	1964	50.24937811	1.756969505	0.878485
		4	1914	2500	1910	2554	54.14794548	1.893282914	0.946641
		5	1944	2426	1939	2480	54.23098745	1.896186476	0.948093
		6	1961	2326	1957	2374	48.16637832	1.684137418	0.842069
		7	1914	2686	1911	2732	46.09772229	1.61180686	0.805903
		8	2015	1956	2010	2014	58.21511831	2.035491612	1.017746
		9	2036	2199	2033	2241	42.10700654	1.472271484	0.736136
		10	2038	2276	2033	2331	55.22680509	1.93100524	0.965503
		11	2065	2272	2061	2319	47.16990566	1.649295751	0.824648
		12	2074	1841	2068	1896	55.32630477	1.934484246	0.967242
		13	2111	1900	2107	1950	50.15974482	1.753835477	0.876918
		14	2149	2053	2145	2099	46.17358552	1.614459418	0.80723
		15	2181	1963	2177	2011	48.16637832	1.684137418	0.842069
		16	2212	1966	2208	2016	50.15974482	1.753835477	0.876918
		17	2190	2030	2186	2067	37.21558813	1.301243039	0.650622
		18	2307	1988	2303	2032	44.18144407	1.544804192	0.772402
		19	2397	1988	2392	2046	58.21511831	2.035491612	1.017746
		20	2331	2208	2329	2248	40.04996879	1.400347159	0.700174
		21	2004	2609	2001	2652	43.10452412	1.507149686	0.753575
		22	2023	2555	2021	2599	44.04543109	1.540048498	0.770024
		23	2050	2543	2047	2595	52.08646657	1.821203304	0.910602
		24	2081	2543	2078	2589	46.09772229	1.61180686	0.805903
		25	2104	2517	2100	2561	44.18144407	1.544804192	0.772402
		26	2117	2489	2115	2529	40.04996879	1.400347159	0.700174
		27	2161	2380	2158	2418	38.11823711	1.33280416	0.666402
		28	2184	2363	2179	2415	52.23983155	1.82656571	0.913283
		29	2258	2372	2254	2423	51.15662225	1.788691297	0.894346
		30	2403	2401	2399	2450	49.16299421	1.718984093	0.859492

計測に用いた式

$$\text{移動ピクセル} = \sqrt{(\text{赤X座標} - \text{青X座標})^2 + (\text{赤Y座標} - \text{青Y座標})^2}$$

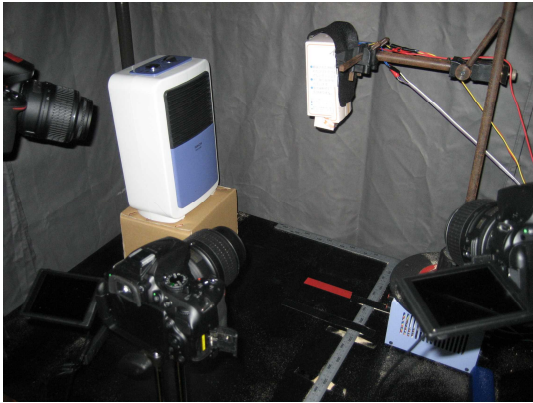
$$\text{移動距離} = 1 \text{ピクセル当たりの長さ} \times \text{移動ピクセル}$$

$$\text{速度} = \text{移動距離} \div 2$$

<実験 2 3D 計測>

次に、3DPIV 計測を行う。この実験ではカメラを 3 台用意し、3 方向から粒子の挙動を撮影する。この場合、速度 3 成分が計測できる。2 次元計測と同様に、得られた画像は画像解析し座標を調べ、データを整理する。そして速度を求める。今回の計測領域は (50mm×50mm×50mm) である。LED を照射する領域も計測領域に近づけている。

実験設備



<使用機器>

カメラ 3 台 D5200

パルス発生装置 (実験 1 参照)

パワーLED (実験 1 参照)

LED 制御装置 2 台 (実験 1 参照)

暗室 (縦 100 横 110 高さ 170)

遠隔手動シャッター装置 MC-DC2 3 台



3 台を分解し一つに合体させ三台のカメラが同時にシャッターを切れるように改造

熱風発生装置

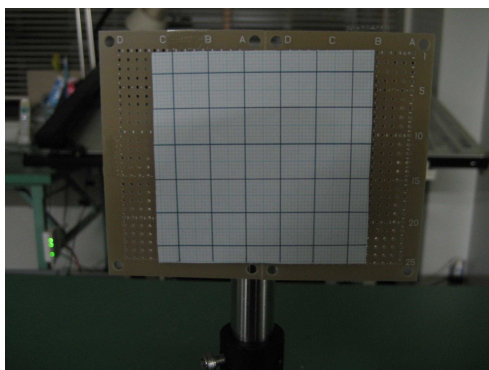


画像解析ソフト Image J

< 3次元化を行うためのカメラ校正の方法 >



上図のようにカメラを配置し固定する。



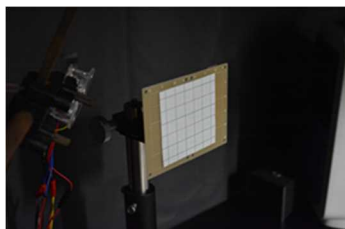
1マス10[mm]の格子で5マスある。この格子の交差点を利用する。

左下を原点とし原点から右方向を x 軸、原点から上方向を y 軸、原点から手前方向に z 軸とする。

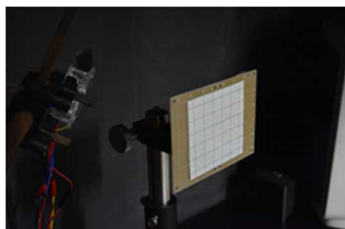
1 3台のカメラの格子にピントを合わせ一枚撮影する。この点を基準とする ($z=0$ [mm])

2 次に $Z=10$ [mm]の位置に動かし撮影する。これを繰り返し $Z=20$ [mm]~ 50 [mm]まで繰り返す。(6枚×3の画像が得られる) 下図で画像のズレが確認できる。

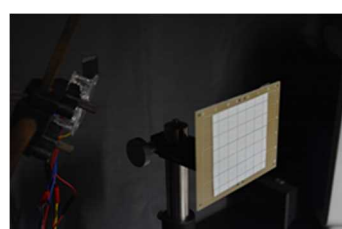
カメラ 1



Z=0

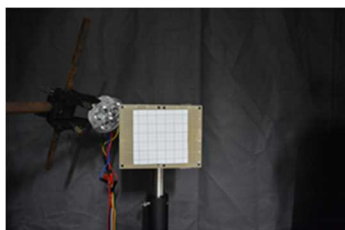


Z=30

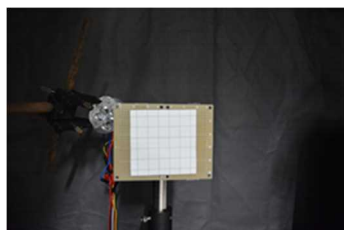


Z=50

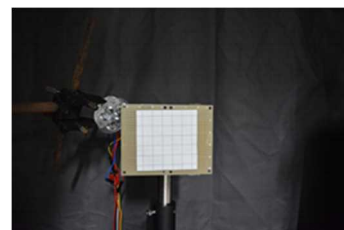
カメラ 2



Z=0



Z=30



Z=50

カメラ 3



Z=0



Z=30



Z=50

3 格子には36点の交差点がありその座標のxとyについてのピクセルを読む。
この作業を18枚の画像について行う。(18×36点)

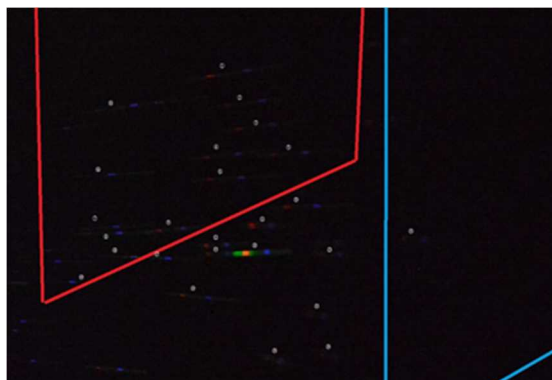
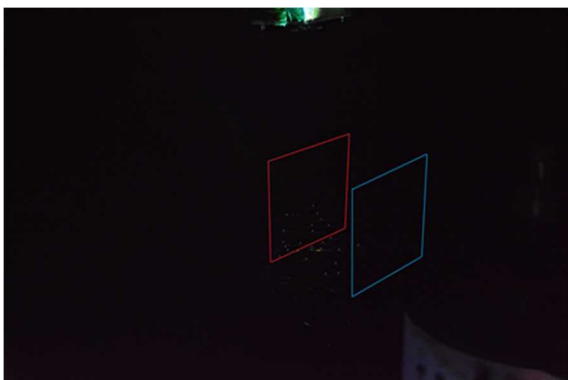
測定データの一部

			カメラ1		カメラ2		カメラ3	
X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	x1	y1	x2	y2	x3	y3
0	0	0	2875	2687	2356	2687	1651	1592
10	0	0	3034	2609	2514	2681	1811	1645
20	0	0	3189	2537	2670	2676	1973	1698
30	0	0	3337	2465	2824	2671	2141	1755
40	0	0	3476	2397	2973	2665	2313	1811
50	0	0	3617	2328	3128	2660	2498	1872
0	10	0	2862	2481	2353	2532	1647	1380
10	10	0	3025	2407	2511	2527	1806	1430

これより (X[mm],Y[mm],Z[mm]) と(xピクセル,yピクセル)の関係が得られる。

<実験結果>

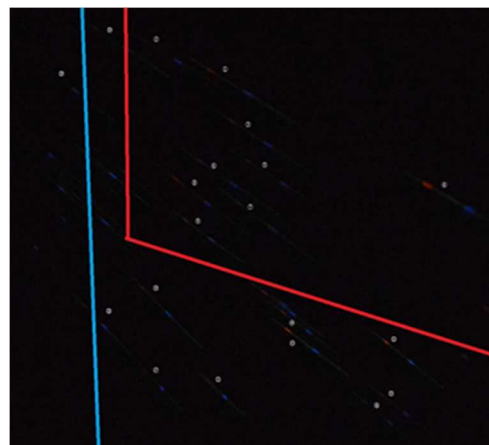
カメラ 1



カメラ 2



カメラ 3



画像の枠はカメラ校正にしようした格子一であり赤枠は $Z=0\text{mm}$ 青枠は $Z=50\text{mm}$ であり頂点を結んだ領域に入っている粒子が今回の計測領域である。

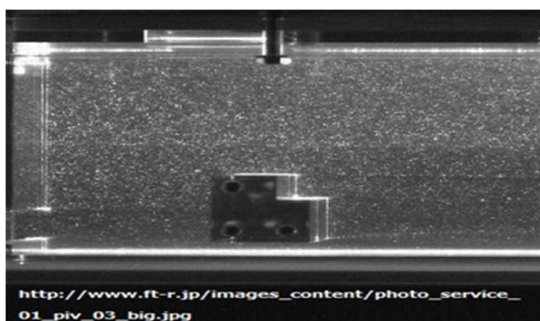
左図はカメラ 3 台で撮影した画像 右図はそれぞれの拡大図 (白く見えているのは粒子の対に番号は振られている。この番号は粒子の追跡時に使用)

流速測定結果（カメラ校正の結果より算出）

	赤x座標	赤y座標	赤z座標	青x座標	青y座標	青z座標	移動距離	速度
1	21.85	25.07	7.54	27.13	23.84	7.56	5.42	2.710706
2	23.01	19.51	5.3	28.21	18.23	5.29	5.36	2.677616
3	5.5	25.53	22.66	10.7	24.33	22.64	5.34	2.668352
4	17.15	13.81	8.27	22.51	12.13	8.23	5.62	2.80863
5	21.18	13.63	13.47	26.3	11.96	13.5	5.39	2.692777
6	6.87	18.85	19.07	11.5	17.25	19.24	4.90	2.450806
7	13.71	8.99	12.09	18.71	7.32	12.11	5.27	2.635778
8	9.97	10.7	7.9	13.74	8.92	7.8	4.17	2.085144
9	6.6	7.84	5.22	11.14	6.39	5.22	4.77	2.382966
10	21.85	7.01	10.55	26.71	5.9	10.57	4.99	2.492594
11	19.79	7.53	6.67	23.61	6.42	6.54	3.98	1.990063
12	22.91	16.24	28.96	27.97	16.83	29.09	5.10	2.54797
13	32.5	7.64	19.07	36.06	6.65	18.94	3.70	1.848689
14	37.64	7.05	22.2	41.02	5.4	22.01	3.77	1.883016
15	7.8	17.3	42.26	12.59	18.06	42.42	4.85	2.426278
16	22.12	27.13	13.9	27.64	26	13.81	5.64	2.817596

まとめ

既存製品との比較



	精度	コスト	安全性
本実験	◎	◎	○
既存製品	○	×	△

実験結果より、パワーLED とデジタルカメラを用いた我々の装置でも、速度データが得られることが分かった。

また既存製品では単色で行うので粒子の軌跡がわかりづらいが今回の実験では三色を用いているので粒子の軌跡がわかりやすいという結果になった。

今後の課題

今回の実験においては三枚の写真の粒子の照合を自動化ができていない。自動化できると写真を撮ることで簡単に正確な速度を求めることが可能となるだろう。LED の輝度をさらに上げることで測定領域の拡大もできると考えられる。我々の装置が実現すれば、LED の活用分野の拡張に貢献できると考える。