

LA RED DE SEGUIMIENTO DE BÓLIDOS Y METEOROS DE LA SOCIEDAD MALAGUEÑA DE ASTRONOMÍA

Ponencia presentada por

Alberto Castellón¹

al II Congreso Pro-Am de la Sociedad Española de Astronomía

Alcalá la Real (Jaén) 12-14 de junio del 2015

Resumen. Uno de los campos con más actividad al que se ha dedicado la Sociedad Malagueña de Astronomía (SMA) es el de los meteoros y lluvias de estrellas. Desde hace años se mantiene una colaboración con los astrónomos profesionales consistente en la remisión de partes de observaciones visuales así como de detecciones fotográficas desde la estación de El Pinillo (Torremolinos). A comienzos del 2014, la SMA decidió dar un nuevo impulso para conseguir una red de estaciones que permita el cálculo de la trayectoria atmosférica de un meteoroides o bólido así como la obtención, cuando sea posible, de sus elementos orbitales.

Breve descripción de las estaciones

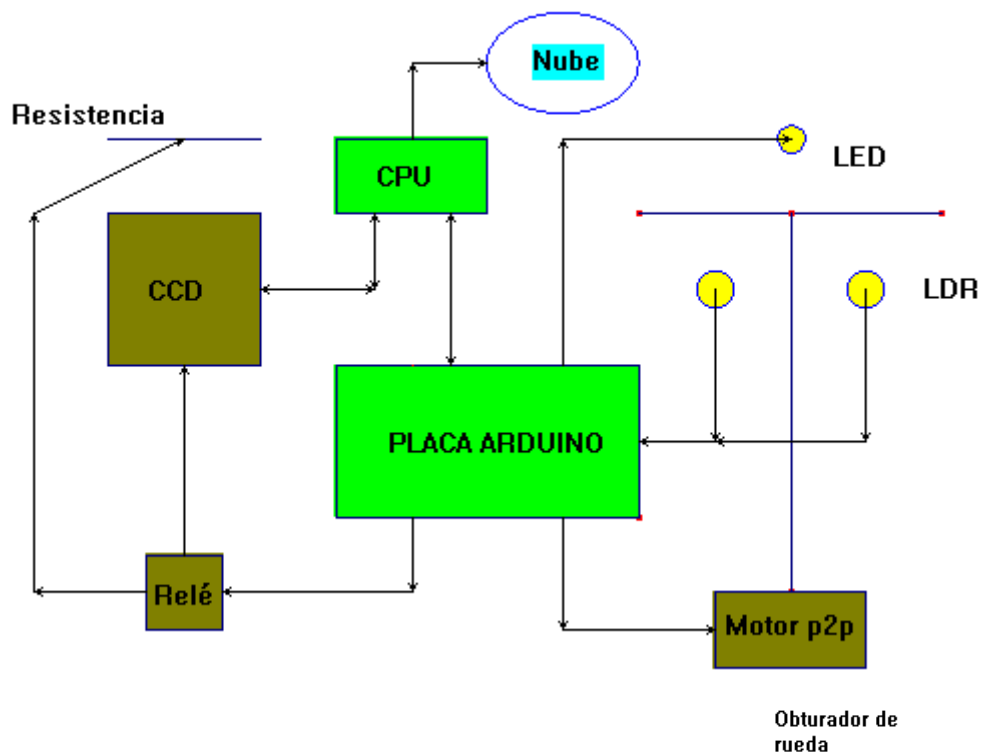
La única estación que estuvo funcionando desde el 2006 constaba de una CCD SBIG ST-402 adaptada por el fabricante como cámara *allsky*. La adaptación consistía en la sustitución de su carcasa por una caja metálica estanca, preparada para resistir las condiciones de exterior, a la que se dotó de una ventana superior cubierta con filtro RG-630 cuya función es la de disminuir la contaminación lumínica y el brillo de la Luna. Los bordes de esta abertura son calentados por una resistencia para evitar condensaciones. Un objetivo de 2.6mm de distancia focal a F1/6 recoge un campo de 120°x80°.

Por desgracia, en el proceso de adaptación se eliminaron el chip Peltier refrigerador y el obturador electromecánico de la ST-402 original, haciendo imposible la toma de *darks*. Las imágenes aparecían entonces muy contaminadas de

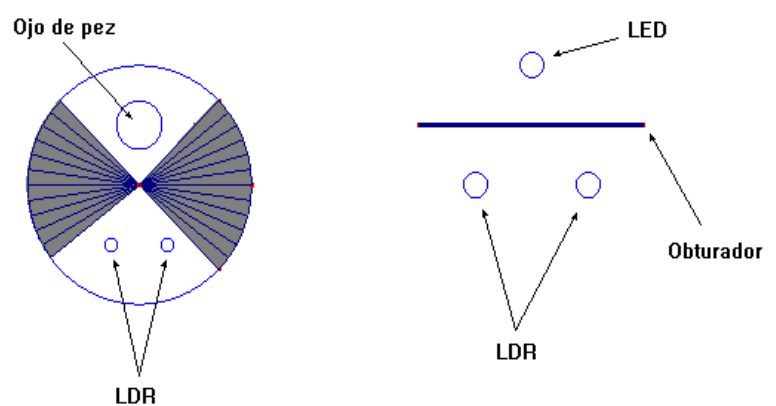
¹ Profesor Titular del Departamento de Álgebra, Geometría y Topología de la Universidad de Málaga y Presidente de la Sociedad Malagueña de Astronomía.

ruido térmico y plagadas de píxeles calientes. Así, aunque ello no afecta a la visión de las trazas de los meteoroides, esta circunstancia suponía un grave inconveniente tanto para el tratamiento de las imágenes como para el algoritmo de detección automática.

De ahí que se haya incorporado un obturador de rueda con dos aspas movido por un motor paso a paso y dos detectores de luz LDR más dos LEDs blancos que permiten situar sobre el objetivo, bien la abertura entre aspas, bien una de las aspas, según se quiera adquirir imágenes o *darks*. Este sistema está controlado por una tarjeta Arduino UNO conectada al ordenador mediante cable USB.



El sistema de obturación queda esquematizado en el gráfico de la derecha, donde se visualiza el obturador visto desde arriba y de perfil. Para encontrar el punto de apertura o cierre, Arduino enciende el LED y mueve paso a paso la rueda completando medio giro.



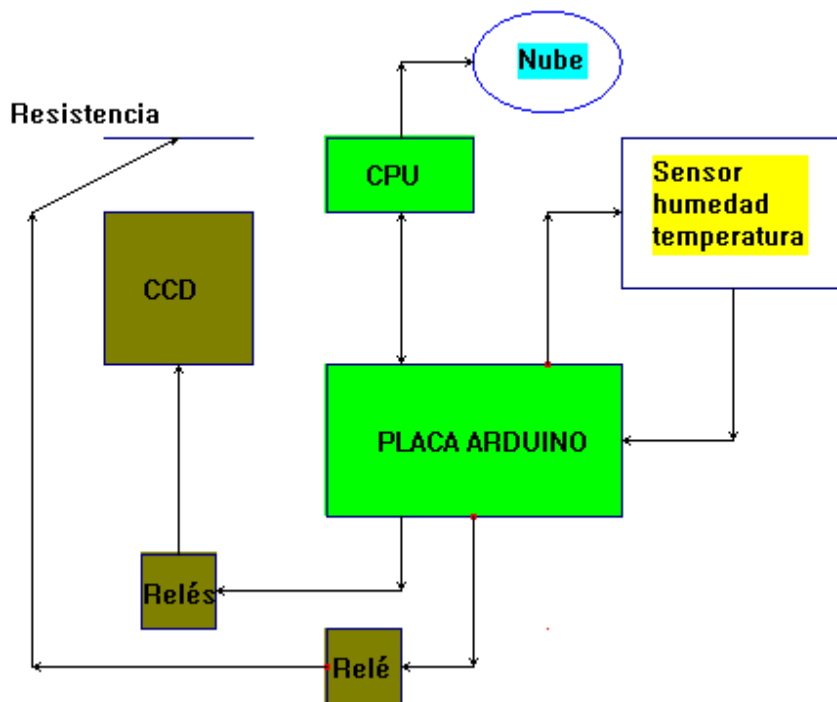
En cada paso se suman las lecturas de las fotorresistencias LDR, y después se lleva el motor al lugar donde se encontró un valor mínimo, para abrir, o un máximo, para

cerrar. Se está en conversaciones con el Parque Natural de la Sierra de Aracena y Picos de Aroche para trasladar allí esta cámara, junto con un sistema SQM de monitorización permanente de la calidad del cielo nocturno.

Para la segunda estación se recurrió al Convenio de Colaboración que la Sociedad Malagueña de Astronomía tiene firmado con el Observatorio Astronómico del Torcal (OAT). Allí ha instalado la SMA una CCD allsky, mientras que el Director del OAT, D. Francisco Gálvez, se ha ocupado de proporcionar el ordenador de control. En esta ocasión se adquirió la SBIG Allsky-Camera, que no es sino una adaptación del fabricante de la SBIG ST-4. De nuevo Santa Bárbara Instruments la proveyó de carcasa estanca, y en este caso de un objetivo ojo de pez con 180°x180° de campo, cúpula de metacrilato de calidad óptica, obturador giratorio a 5/10Hz y cinta calentadora antirroció.

Una ventaja de esta cámara sobre otras es que puede descargarse una imagen mientras se captura la siguiente, por lo que la vigilancia llega a ocupar el 100% del tiempo útil de observación. Para el encendido/apagado de la cámara se ha incorporado un relé/USB controlado por el ordenador. Esta estación lleva funcionando ininterrumpidamente desde el 23 de abril del 2014.

La tercera estación se instalará en San Jorge (Extremadura), y en la actualidad



está superando los últimos periodos de prueba en Alhaurín de la Torre y Torremolinos (Málaga). Consiste en una SBIG ST-8XME a la que se ha acoplado un ojo de pez Nikon de 4mm que da un campo de 180°x180°. Se ha construido una caja estanca en aluminio

con cúpula de metacrilato superior que aloja a todo el equipamiento. Este consiste en, además de la CCD y la lente, una cinta antirroció, 4 relés y un sensor de humedad/temperatura, todos ellos controlados por otra tarjeta Arduino UNO.

Sin intervención de la CPU, la tarjeta Arduino está programada para leer el sensor de humedad/temperatura y calcular el punto de rocío. Cuando la temperatura está a menos de dos grados del punto de rocío, enciende la cinta calentadora activando el relé correspondiente.

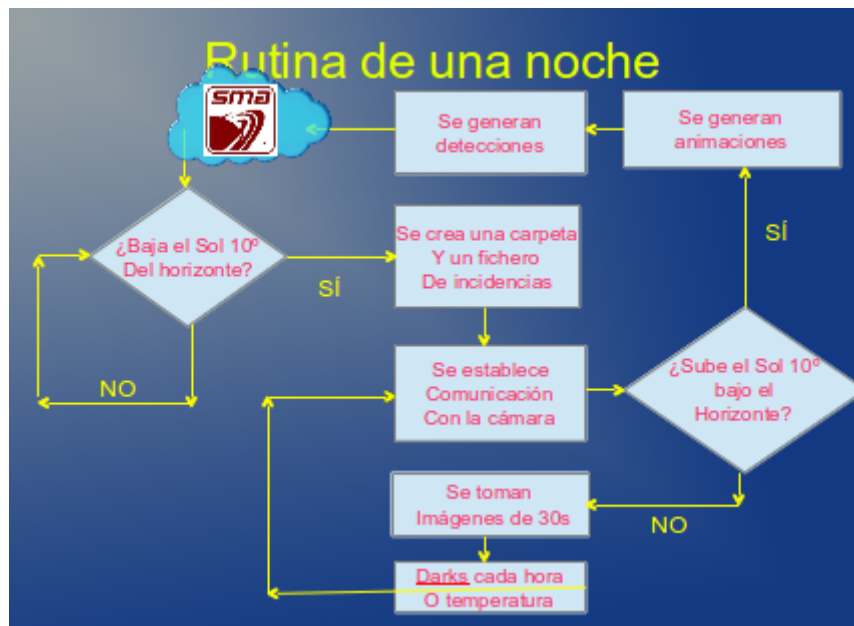
Por último, se ha adquirido una cámara de vídeo ZWO ASI CAM 120MM a la que se ha acoplado un ojo de pez Fujinon 1.4mm que proporciona 185°x185° a efectos de medir velocidades de los meteoros con más resolución temporal que la que proporciona el obturador giratorio de la CCD del OAT. Esta cámara, que se alimenta a través del cable USB, se enciende y se apaga por medio de un relé controlado por otra tarjeta Arduino que interrumpe la línea de +5V del bus.

El software de captura

Desde el principio la SMA se propuso que las estaciones operasen de manera por completo autónoma, ya que en las tres ubicaciones la presencia humana es esporádica, por lo que no se puede depender de la intervención de una persona, ya sea para arrancar/detener diariamente los programas o solventar las vicisitudes que se presenten. Ello ha condicionado la redacción del software así como la de todo el equipamiento. No solo se ha conseguido una automatización, sino una robotización de las estaciones al reaccionar ellas por su cuenta a las circunstancias sobrevenidas.

En todos los casos los programas son de elaboración propia, ya que los proporcionados por el fabricante para cada una de las cámaras no respondían a las necesidades del sistema. Se han utilizado los lenguajes C, C++, Python y Perl, además de varios script del sistema.

El trabajo diario de una estación se esquematiza en la figura siguiente:



Lo primero que se comprueba es que la cámara está accesible, encendiéndola, comunicándose con ella y apagándola después. Si aún no se ha creado el directorio donde se guardarán los ficheros de esa noche, se genera y se abre un archivo de incidencias. Cada dos minutos, se calcula la posición del Sol. Cuando se sitúa a 10° bajo el horizonte, se enciende la cámara, se baja la temperatura del chip a -5°C (si es que la CCD tiene esa opción) y se toma el *dark* inicial. A partir de aquí, y mientras el Sol permanezca a 10° bajo el horizonte, se toman sucesivas capturas de 30 segundos de exposición. A cada una se le resta el *dark*, se le aplica una máscara que recorte las zonas no útiles del paisaje o las de gran contaminación lumínica y se archiva el resultado en el directorio de esa noche. Bien cada hora o cada vez que la temperatura varíe 1°C se toma un nuevo *dark*. Si la temperatura se acerca a menos de 2°C del punto de rocío, se enciende la cinta calentadora. Si en algún momento se pierde comunicación con la CCD, se recurre a la solución universal de los informáticos: se apaga la cámara, se esperan 5 segundos y se vuelve a encender. Esto es mano de santo.

Al amanecer, se cierra el fichero de incidencias, donde se han anotado los sucesos notables que se hayan producido durante la noche, se generan animaciones gif de 60 en 60 capturas a partir de los ficheros FITS y se comienza el proceso de detección automática que será descrito más adelante. Los archivos generados

(animaciones y detecciones) se suben a una nube con soporte en un disco NAS e IP fija conectado al *router* de la sede de la SMA.

En alguna de las estaciones, como ocurre en la de El Torcal, los apagones de luz y de Red no son infrecuentes, así que el sistema está preparado para reiniciarse, si se ha producido un corte de suministro eléctrico, o rearmar el *router* cuando se pierda conexión a Internet. Aparte de que se ha comprobado que estos imprevistos son subsanados autónomamente por las estaciones, se han realizado duros experimentos en los que se ha desconectado el cable USB o el de la fuente de alimentación en mitad del proceso, volviendo en todos los casos a funcionar al volver a la normalidad.

El trabajo que realiza la cámara de vídeo difiere algo del de las CCD, ya que filmar toda una noche puede agotar rápidamente el espacio de almacenamiento. Así que el programa que la controla solo graba en disco duro secuencias de 40 fotogramas cada vez que se detecta un movimiento.

El *software* de detección

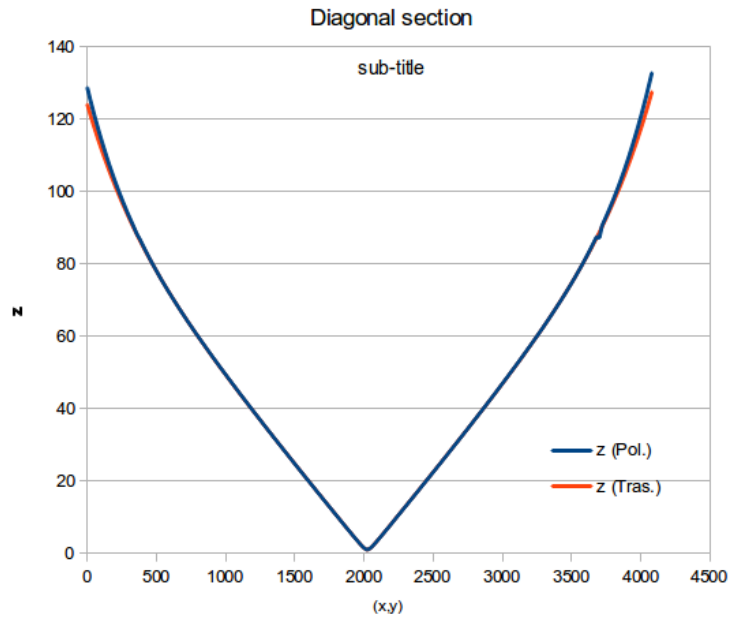
Tal y como se ha planteado el algoritmo de detección, se precisa resolver la astrometría de cada cámara. Para ello el autor de esta ponencia ha ultimado un método que es variación y desarrollo del introducido por Borovicka, Spurný y Keclíková en [1] y [2]. La idea genial de Borovicka y su equipo se basaba en distinguir entre el cenit y el lugar de la esfera celeste al que apunta el eje óptico. Aunque no es este el lugar en el que detallar el proceso, se bosquejará al objeto de apreciar las diferencias con el método aplicado por el autor.

La astrometría depende de un conjunto de parámetros (las constantes de la placa) que hay que determinar a partir de una muestra significativa de estrellas guía dispersas con homogeneidad por la imagen. Algunos de estos parámetros ajustan la desviación del eje óptico respecto del cenit. Otros convierten distancias celestes en distancias en el chip, y un tercer grupo corrige la falta de perpendicularidad entre el eje óptico y el chip. Además de fórmulas de la trigonometría esférica, el método involucra funciones trascendentes.

La variación utilizada por el autor consiste en sustituir estas funciones

trascendentes por funciones polinómicas más sencillas. En el gráfico de abajo se observa una comparación del comportamiento de ambas funciones. Adviértase que incluso en distancias cenitales imposibles de alcanzar con cámaras terrestres la función polinómica y la trascendente tienen un altísimo grado de coincidencia.

X	Y	z (Pol.)	z (Tras.)	distance abs(C-D)
1	1	129,717516	124,0974836	4,620032425
21	21	125,625051	121,4856565	4,139394534
41	41	122,663674	118,9687153	3,694958726
61	61	119,826407	116,5412983	3,28510868
81	81	117,106558	114,1983458	2,908212214
101	101	114,49772	111,935083	2,562636975
121	121	111,993759	109,7470047	2,246754298
141	141	109,588809	107,6298598	1,958949243
161	161	107,277263	105,5796372	1,69762584
181	181	105,053766	103,5925524	1,46121356
201	201	102,913209	101,6650349	1,248174054
221	221	100,850719	99,79371581	1,057003185
241	241	98,861653	97,97541659	0,886236406
261	261	96,941589	96,20713851	0,734450488
281	281	95,086322	94,48605234	0,60026966
301	301	93,291853	92,80948882	0,482364181
321	321	91,554386	91,17492963	0,379456369
341	341	89,870316	89,57999887	0,290317128
361	361	88,12659	88,02245501	0,104134992
381	381	86,833001	86,50018328	0,332817719
401	401	85,264767	85,01118855	0,253578455
421	421	83,733612	83,55358851	0,180023494
441	441	82,247759	82,12560734	0,122151659
461	461	80,802945	80,72556968	0,077375319
481	481	79,394956	79,35189493	0,043061067

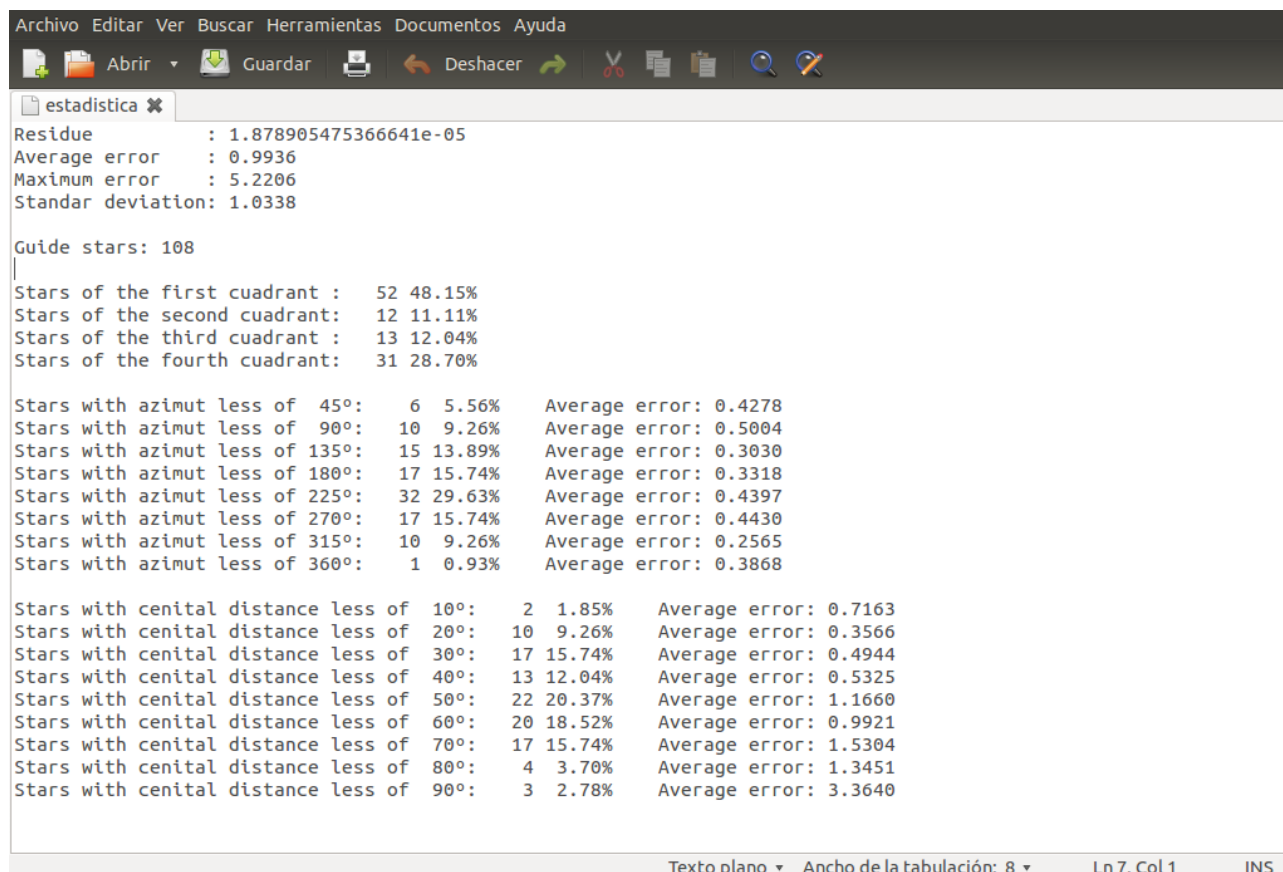


Son dos las ventajas que se obtienen del uso de polinomios en lugar de funciones trascendentes. Por un lado, el proceso de convergencia necesario para encontrar las constantes de la placa se simplifica bastante gracias a la facilidad para dar adecuados valores iniciales a los parámetros. En el método original, si los valores iniciales no están relativamente cerca de los finales, las iteraciones o divergen o convergen a soluciones absurdas. Usando polinomios, un simple ajuste por mínimos cuadrados lineal permite encontrar valores iniciales bastante cercanos a los finales, produciéndose en todos los casos una rápida y exitosa convergencia. Además, la sustitución de funciones exponenciales por polinómicas acelera la velocidad de proceso en un orden de magnitud, lo que viene muy bien a la hora de aplicar cálculo masivo a la imagen completa.

Y es que, como se verá más adelante, el proceso de detección concebido aquí precisa en cierto momento de un cálculo de la astrometría directa e inversa de todos los píxeles del chip. Los coprocesadores matemáticos evalúan a mucha mayor velocidad y con más precisión un simple polinomio, donde solo se realizan sumas y

multiplicaciones, que los términos del desarrollo en serie de una función trascendente.

El procedimiento astrométrico ha sido implementado con éxito en sistemas CCD/Objetivo de muy distinta factura, desde chips de 640x480 hasta 4096x4096 píxeles, y con ojos de pez o grandes angulares de diferentes características, lo que muestra su gran flexibilidad. En todos los casos se obtiene precisión subpíxel. He aquí una estadística:



```
Archivo Editar Ver Buscar Herramientas Documentos Ayuda
Abrir Guardar Deshacer
estadística x
Residue : 1.878905475366641e-05
Average error : 0.9936
Maximum error : 5.2206
Standar deviation: 1.0338

Guide stars: 108
Stars of the first cuadrant : 52 48.15%
Stars of the second cuadrant: 12 11.11%
Stars of the third cuadrant : 13 12.04%
Stars of the fourth cuadrant: 31 28.70%

Stars with azimuth less of 45°: 6 5.56% Average error: 0.4278
Stars with azimuth less of 90°: 10 9.26% Average error: 0.5004
Stars with azimuth less of 135°: 15 13.89% Average error: 0.3030
Stars with azimuth less of 180°: 17 15.74% Average error: 0.3318
Stars with azimuth less of 225°: 32 29.63% Average error: 0.4397
Stars with azimuth less of 270°: 17 15.74% Average error: 0.4430
Stars with azimuth less of 315°: 10 9.26% Average error: 0.2565
Stars with azimuth less of 360°: 1 0.93% Average error: 0.3868

Stars with cenital distance less of 10°: 2 1.85% Average error: 0.7163
Stars with cenital distance less of 20°: 10 9.26% Average error: 0.3566
Stars with cenital distance less of 30°: 17 15.74% Average error: 0.4944
Stars with cenital distance less of 40°: 13 12.04% Average error: 0.5325
Stars with cenital distance less of 50°: 22 20.37% Average error: 1.1660
Stars with cenital distance less of 60°: 20 18.52% Average error: 0.9921
Stars with cenital distance less of 70°: 17 15.74% Average error: 1.5304
Stars with cenital distance less of 80°: 4 3.70% Average error: 1.3451
Stars with cenital distance less of 90°: 3 2.78% Average error: 3.3640

Texto plano Ancho de la tabulación: 8 Ln 7, Col 1 INS
```

Los errores se expresan en minutos de arco. El sistema utilizado tenía una resolución media de 2.3 minutos de arco por píxel. Observando el error medio y la desviación típica se concluye con que la astrometría tiene precisión subpíxel.

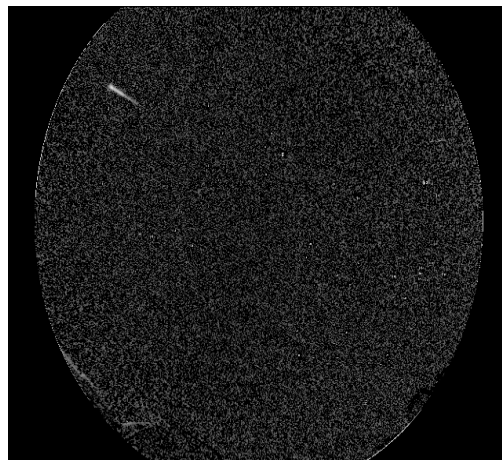
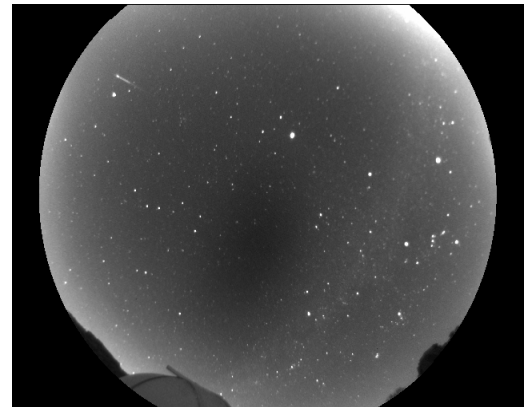
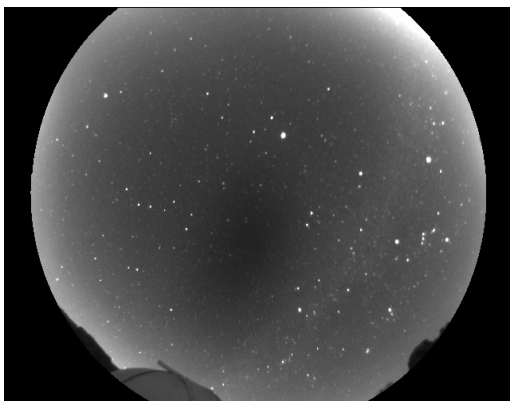
Para proceder con la detección de trazas de meteoroides el programa sigue los siguientes pasos:

1) Pese a que las capturas están restadas de *darks*, se corre un algoritmo de suavización de píxeles calientes.

2) Con la imagen inmediatamente anterior a la que se va a examinar se realiza

un “movimiento diurno” artificial, esto es, se calcula la posición a la que iría a parar cada píxel después de que la esfera celeste se haya movido durante el intervalo $\Delta(t)$ que media entre capturas. Con esta información se genera un archivo FITS que refleja el estado del cielo en el instante t , pero desplazado hasta el instante $t + \Delta(t)$.

3) A la captura a examinar se le resta la anterior avanzada de movimiento diurno. Casi todas las estrellas se aniquilan en esta sustracción, salvo las más brillantes que han podido generar diferentes PSF debido principalmente a la atmósfera y las distorsiones ópticas.



La imagen superior izquierda muestra una captura, la superior derecha, la captura siguiente, y la de abajo, la diferencia entre la segunda y la primera avanzada con movimiento diurno artificial. El meteoro queda al descubierto destacando sobre el resto de la imagen.

4) Se calcula la posición en el chip donde deberían haber caído las estrellas (y planetas) brillantes para desestimarlos de las detecciones.

5) Se corre SExtractor con convenientes parámetros para listar los posibles

centroides de objetos no destruidos por la resta.

6) De la lista de candidatos a detección se eliminan los objetos brillantes “de catálogo” referidos en el paso 4), y se filtran por un algoritmo que desecha las nubes de tamaño medio y grande.

7) En noches de Luna tanto la cúpula como la propia óptica producen reflejos en la imagen (fantasmas) que también es preciso contemplar. A tal fin se han escrito rutinas que calculan las coordenadas en el chip de esos reflejos en función de la posición de la Luna y de la magnitud aparente que tenga en ese momento. Esto suprime todos los reflejos sistemáticos del brillo lunar, pero no algunos esporádicos de comportamiento caótico en función de la atmósfera, el rocío o las pequeñas imperfecciones del metacrilato.

7) Si al final ha quedado al menos una detección, se confecciona una animación gif con la captura anterior, la actual y la posterior en donde se encierran en cuadrados amarillos los objetos detectados, y se añaden las coordenadas correspondientes al fichero de detecciones de la noche.

8) Por último, las animaciones se empaquetan y comprimen y se suben a la nube mencionada en el apartado anterior.

El Grupo de Meteoros de la SMA ha establecido un turno para que sus miembros revisen por la mañana las animaciones y detecciones que las estaciones han subido a la nube. Esto es obligado ya que solo hay un porcentaje de detecciones que responden a auténticos meteoroides. Entre las detecciones “falsas” se cuentan las trazas dejadas por aviones y satélites artificiales, los reflejos lunares esporádicos, los rayos cósmicos y las nubes pequeñas. Todavía se está pensando en mejorar el algoritmo de detección para que deseche las nubes pequeñas. El problema consiste en que, si se fuerza demasiado, podrían perderse meteoros auténticos

El *software* de cálculo de trayectoria y elementos orbitales

Reconocida una traza como dejada por un meteoro, se necesita evaluar la posición en el cielo de dos de sus puntos. El *software* comercial o de uso común en astronomía está pensado para el cálculo de centroides de objetos con PSF más o

menos circular, por lo que no sirve aquí si se desea cierta precisión. De ahí que se haya elaborado un algoritmo que ajusta por mínimos cuadrados a una parábola la traza del meteoro, pudiéndose así elegir dos de sus puntos lo más alejados entre sí. Y es que, aunque en tres dimensiones el meteoro ha recorrido un segmento en la práctica rectilíneo, las deformaciones de la óptica plasman con frecuencia un trazo curvo en el chip. De ahí la elección de una parábola como curva de ajuste.

En concreto, se marcan tres puntos en la trayectoria. El programa calcula la parábola $y = ax^2 + bx + c$ (o $x = ay^2 + by + c$, dependiendo de la pendiente entre el primer y el tercer punto) que pasa por esos tres puntos. Columna a columna (o fila a fila según el caso), se halla la media en cuentas entre un intervalo prefijado centrado en la parábola y se calcula el centro de gravedad de los píxeles que están por encima de la media. Con la nube de puntos resultante se ajusta una nueva parábola. Así, los dos puntos elegidos de la trayectoria quedan al margen de la subjetividad humana.



Si el meteoro ha sido registrado solo en una estación, entonces se calcula la circunferencia máxima resultado de la proyección sobre la esfera celeste de su traza y las distancias angulares mínimas entre ella y los distintos radiantes activos a la fecha. De esa forma, al menos, se obtiene información acerca de si se trata de un meteoróide asociado a una lluvia o de uno esporádico.

Lo ideal es que el meteoro haya sido captado por al menos dos estaciones. Para estos casos se ha escrito un programa que adapta (con algunas variaciones) los métodos descritos en [2] y [3] para el cálculo de la trayectoria atmosférica. Este programa genera dos ficheros. El principal contiene toda la información sobre la trayectoria. A título de ejemplo se incluye el del bólido de la noche del pasado 31 de marzo:

Radiante: 07:13:52.19, -80:53:50.16

Inicio: -04:51:32.63 W +37:38:44.76 N d:119.51Km h:87.70Km

Fin : -04:58:41.88 W +36:55:28.59 N d: 54.36Km h:39.34Km

Impacto previsible:

Impacto: -05:10:41.29 W +35:41: 3.99 N

Ecuación paramétrica de la trayectoria:

xi00: 5095.20196184226 eta00: 433.145925183824 zeta00: 3944.49757748394
a: 0.10147208173435 b: 0.121376637639657 c: -0.98740626312769

Trayectoria desde estación 0:

s	longitud	latitud	α	δ	X	Y
---	----------	---------	----------	----------	---	---

00.00	-4:51:32.63	37:38:44.76	6:47:06.37	72:44:57.41	270.997	114.018
09.49	-4:52:15.63	37:34:26.92	6:49:09.45	68:09:34.67	287.604	116.032
18.98	-4:52:58.62	37:30:08.68	6:50:35.84	63:16:21.41	305.158	118.828
28.48	-4:53:41.59	37:25:50.05	6:51:39.80	58:08:11.00	323.450	122.473
37.97	-4:54:24.54	37:21:31.02	6:52:29.07	52:49:10.30	342.200	126.993
47.46	-4:55:07.48	37:17:11.60	6:53:08.18	47:24:26.88	361.074	132.363
56.95	-4:55:50.39	37:12:51.79	6:53:39.99	41:59:42.78	379.717	138.504
66.44	-4:56:33.29	37:08:31.58	6:54:06.36	36:40:39.96	397.786	145.285
75.94	-4:57:16.17	37:04:10.98	6:54:28.58	31:32:25.68	414.988	152.542
85.43	-4:57:59.03	36:59:49.98	6:54:47.55	26:39:06.19	431.105	160.099
94.92	-4:58:41.88	36:55:28.59	6:55:03.94	22:03:33.58	445.999	167.781

Lluvias activa a la fecha:

Antihelio

Distancias mínimas (en grados) entre radiantes y trayectoria:

90.73 ANT

En él se indican las coordenadas a J2000 del radiante, las coordenadas geográficas del comienzo y fin de la trayectoria, la distancia a la estación 0 y las alturas sobre la superficie terrestre, las coordenadas del posible impacto (de llegar a la Tierra, claro), una tabulación de la trayectoria en función de los kilómetros recorridos (parámetro *s*) que especifica las coordenadas geográficas, las coordenadas celestes y las coordenadas en el chip, las lluvias activas a la fecha y las distancias angulares entre el radiante calculado y los de las lluvias.

El segundo fichero generado es del tipo kml para ser visualizado con Google Earth:



En él se marcan las posiciones de inicio y fin, la trayectoria y el posible impacto.

Si se da el caso de que o bien el obturador giratorio de la estación de El Torcal haya fragmentado la traza, o bien halla sido capturado por la cámara de vídeo, puede calcularse la velocidad del meteoro y correr entonces otro programa (de nuevo adaptado de [1] y [2]) que calcula los elementos orbitales para órbitas elípticas o hiperbólicas. Si no es así, un programa de las mismas características calcula los elementos de una órbita parabólica.

Conclusiones

La Sociedad Malagueña de Astronomía está en curso de ultimar una red de seguimiento de bólidos y meteoros, compuesta por tres estaciones, cuyo objetivo es el de registrar tales fenómenos celestes para su estudio científico.

Planes para el futuro

Una vez que las cámaras que están en periodo de pruebas estén ubicadas de forma definitiva, es voluntad del autor y de la Sociedad Malagueña de Astronomía establecer algún tipo de colaboración con la red española de investigación sobre bólidos y meteoritos (SPMN).

Además, los miembros de la SMA que son profesores de la Universidad de Málaga están planeando solicitar la formación de un grupo de investigación sobre bólidos y meteoros que se apoye en esta red de estaciones.

Bibliografía

- [1] Borovicka, J., Spurný, P., and Keclíková, J., *A new positional astrometric method for all-sky cameras*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 173-178 (1995)
- [2] Dubyago, A.D., *The determination of orbits*, The Macmillan Company, New York, 1961
- [3] Lovell, A.C.B., *Meteor Astronomy*, Oxford at the Clarendon Press, 1954