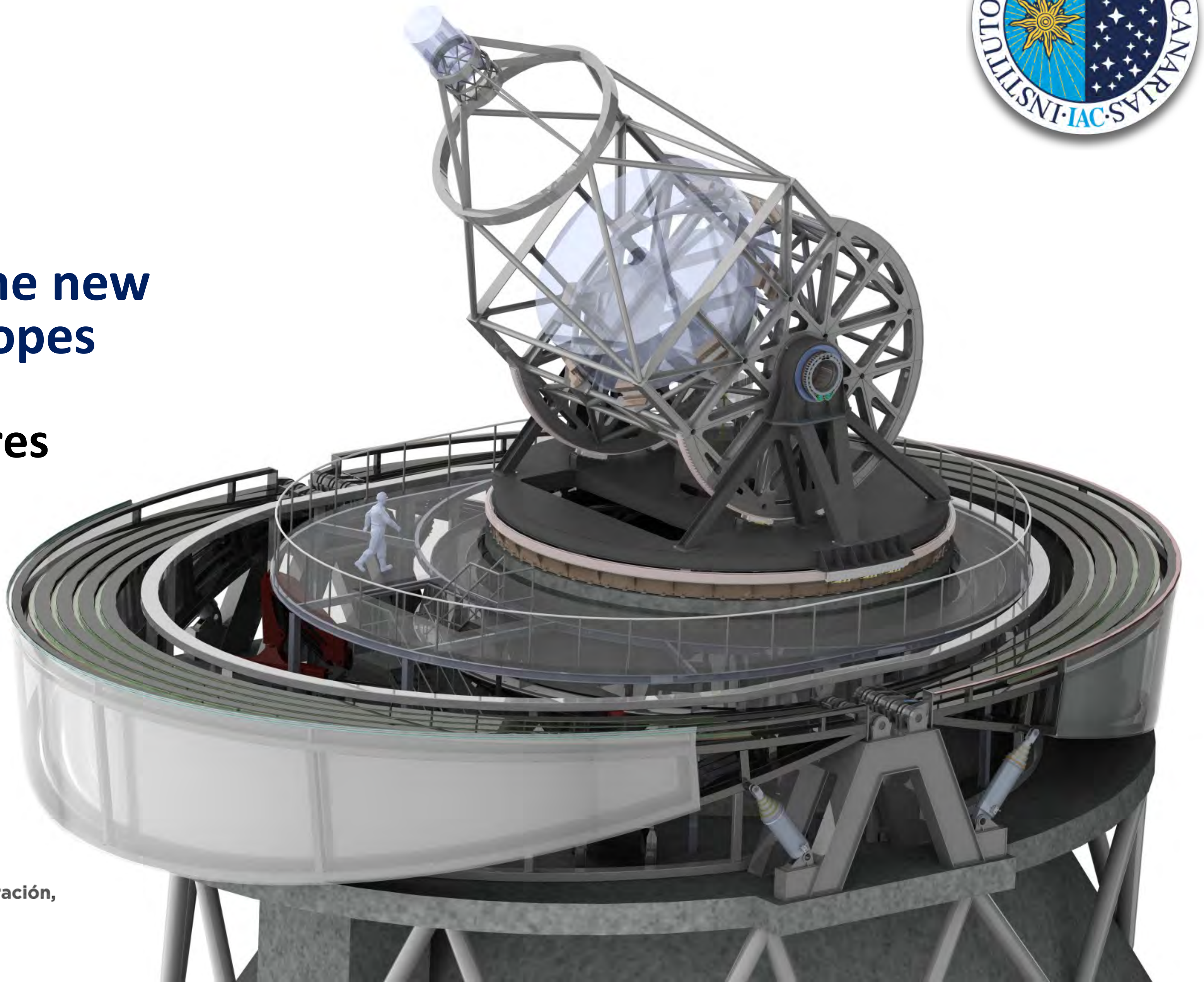
european solar telescope

Correlation algorithms for the new generation of solar telescopes

Nicolás A. Rodríguez Linares
Control Engineer



European Commission

Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información

Canarias avanza con Europa

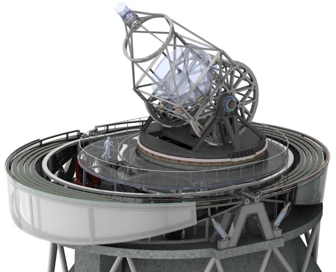
Ministerio de Ciencia e Innovación

Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

Index

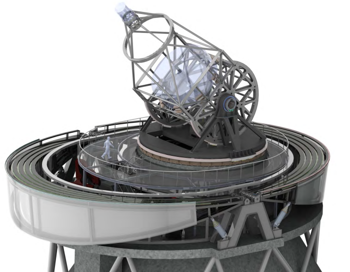
1. MCAO Test-bench
2. A few numbers
3. Squared differences
4. FFT?
5. FFT
6. Conclusions



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

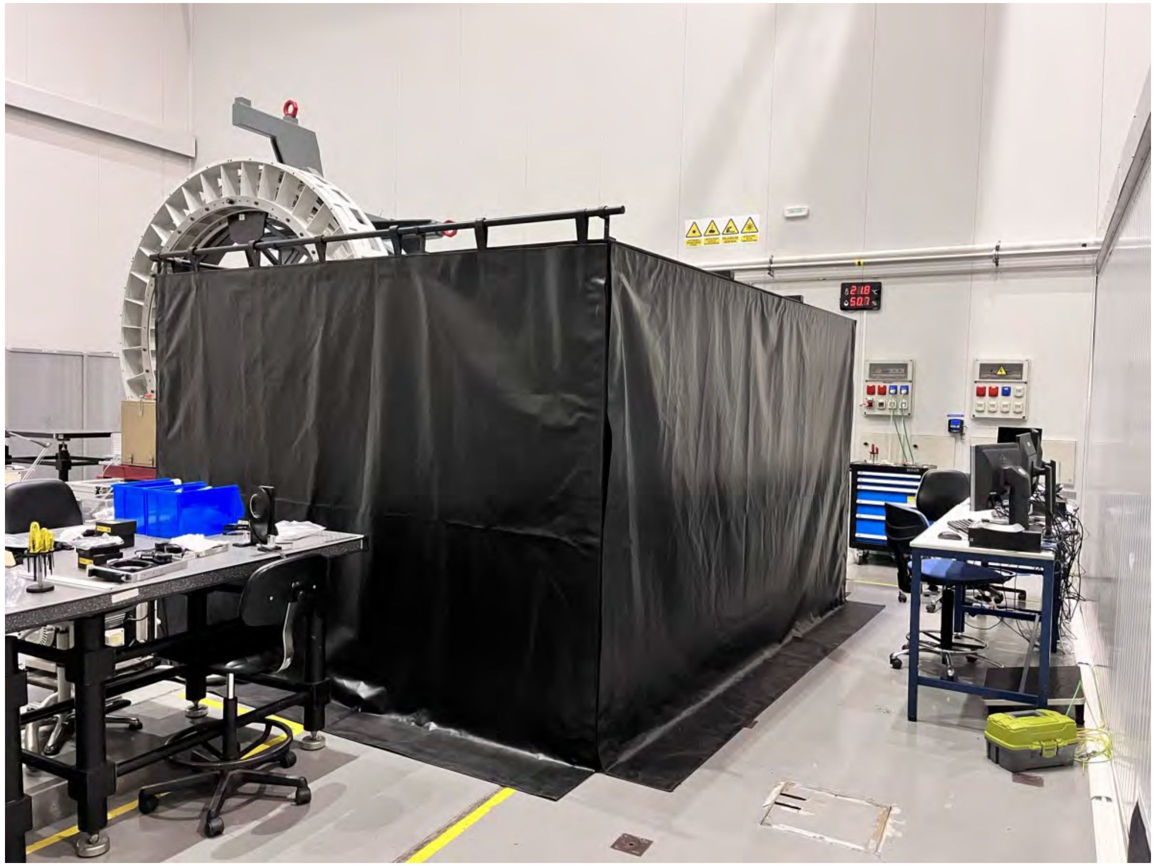
MCAO Test-bench

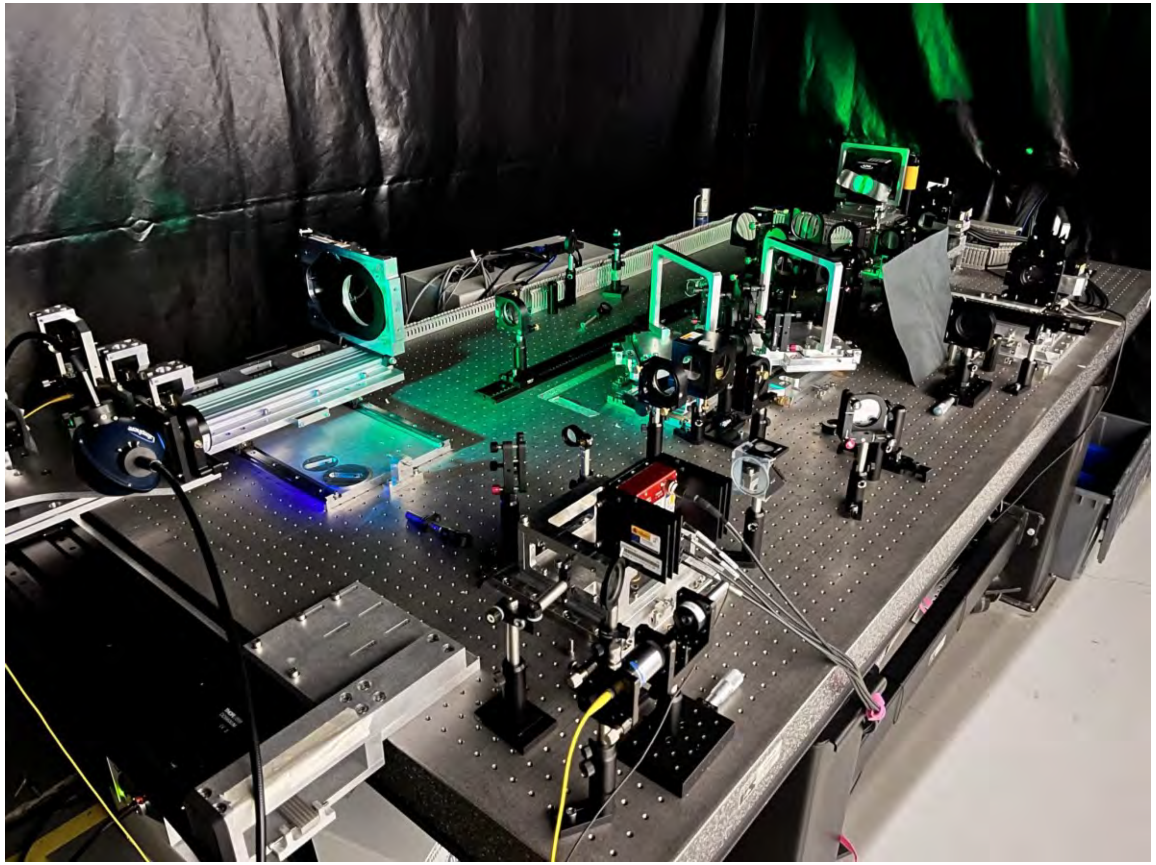
- Objective: gain experience and knowledge with different AO solutions to provide an optimal MCAO solution for the EST.
- General requirements: different AO configurations (SCAO, GLAO, MCAO), number of DMS and different types of SH-WFS.
- Control requirements:
  - Several control schemes (leaky-integrator, POLC,..)
  - Several correlation techniques
  - Should be able to work with zonal and modal control
  - Loop conditions similar to those for EST ➔ dynamic conditions scaled and comparable
- Equipment:
  - Ground layer DM: ALPAO 820-acts
  - Altitude DMs: ALPAO 2x 468-acts
  - 2xSH-WFS
    - High order (on-axis and binning): 3002x3952 px
    - High-order Multi-directional: 6004x7920 px
  - Server: 4x Xeon Gold, 384 Gb RAM
- RTC Software: Durham Adaptive Optics Real Time controller (DARC), used in GTCAO



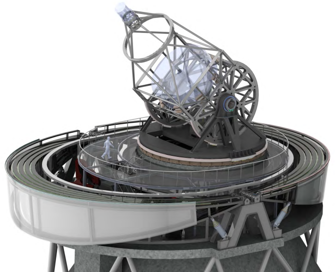
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

MCAO Test-bench

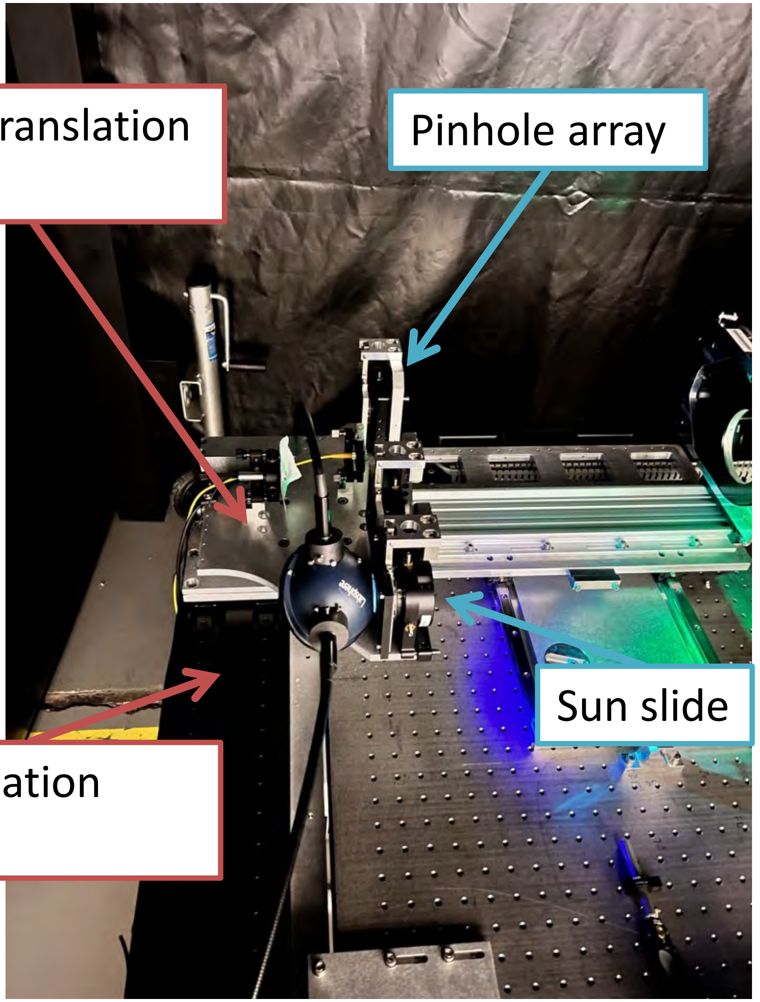


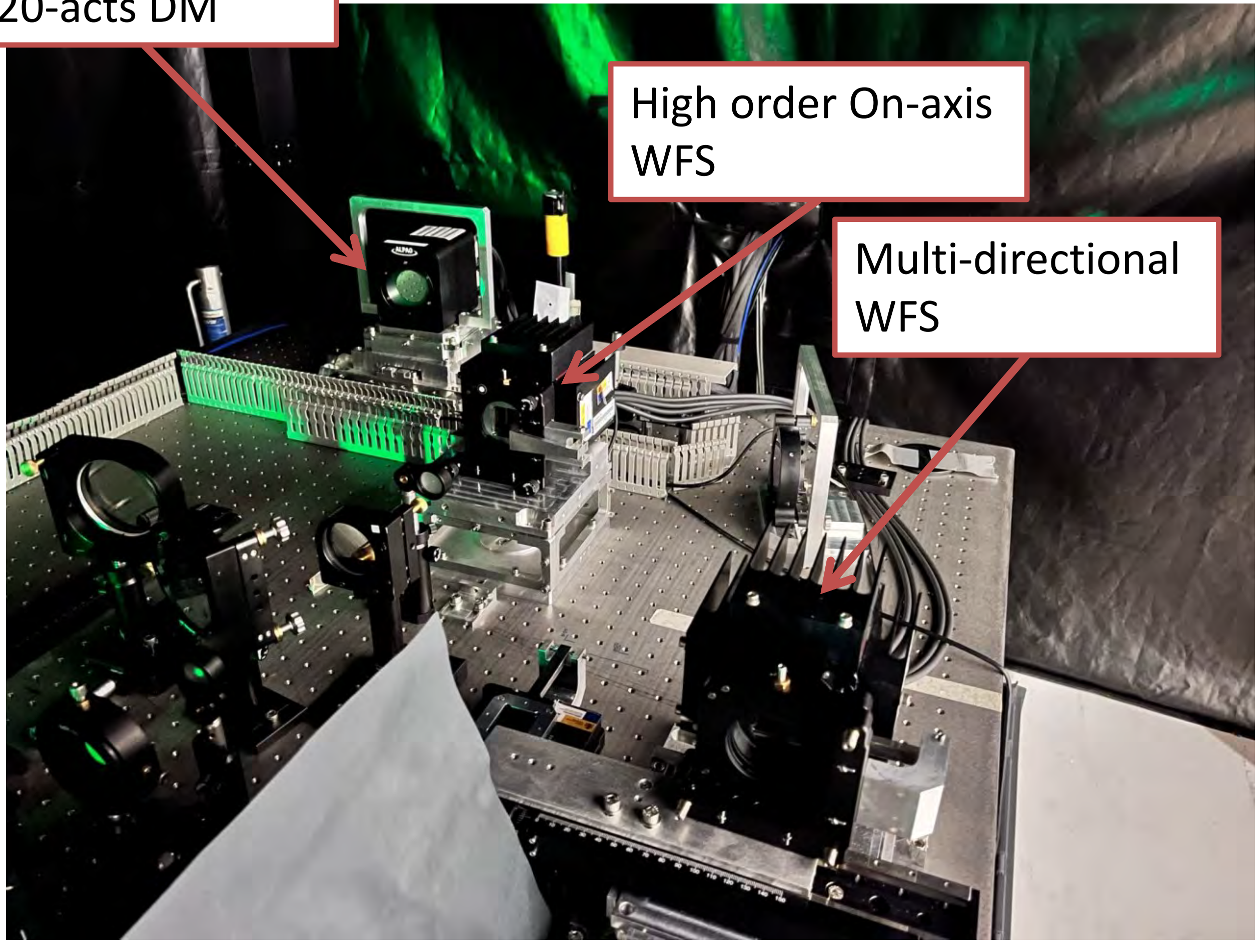


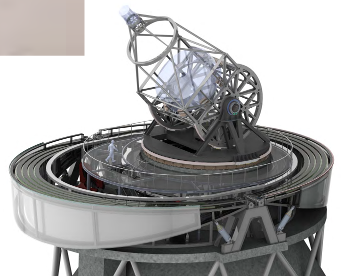
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"



MCAO Test-bench

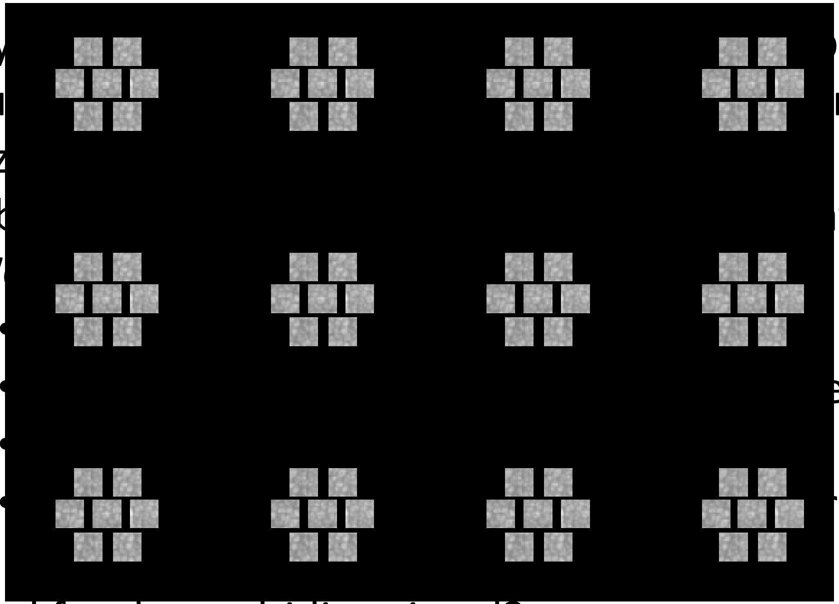




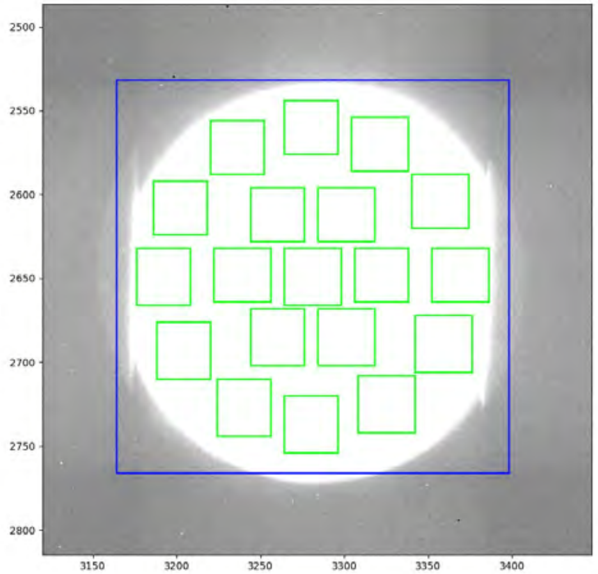


MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

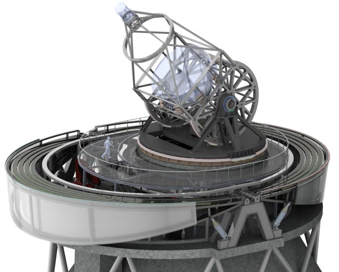
Let’s see the numbers!



- Dy … s!
- Tu … namically create an … , scaled to 30 Hz
- Ob … t 30 Hz
- W
  - …
  - … ents
  - …
  - … rmance obtained (G … standard



- And for the multidirectional?
  - Directions are picked by software
  - 7 directions (33 “ circumference, 10 “ per subwindow) ➔ ~5943 subwindows = 11886 slopes
  - 19 directions (60 “ circumference, 10 “ per subwindow) ➔ ~16131 subwindows = 32262 slopes
  - 25x25px per subwindow (0,3”/px) ➔ more subaps, smaller patterns to match

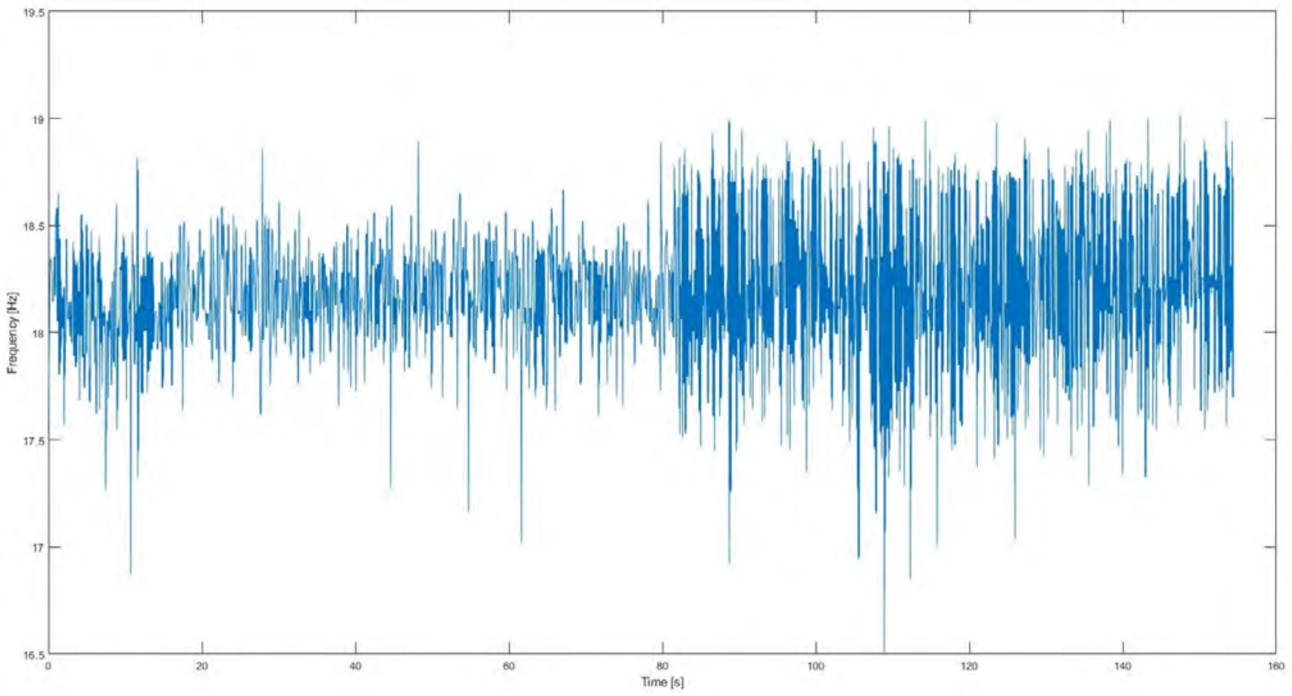


MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

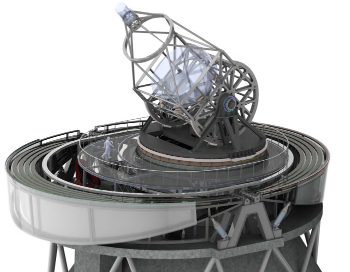
So… what's the problem?

Situation: GLAO, using the multidirectional WFS:

- Squared differences + parabolic ➔ works fine, but speed is a problem
- Using 7 directions, subapertures of 25x25px ➔ ~18 Hz (**30 Hz** expected)



➢ Easiest solution: clip the window

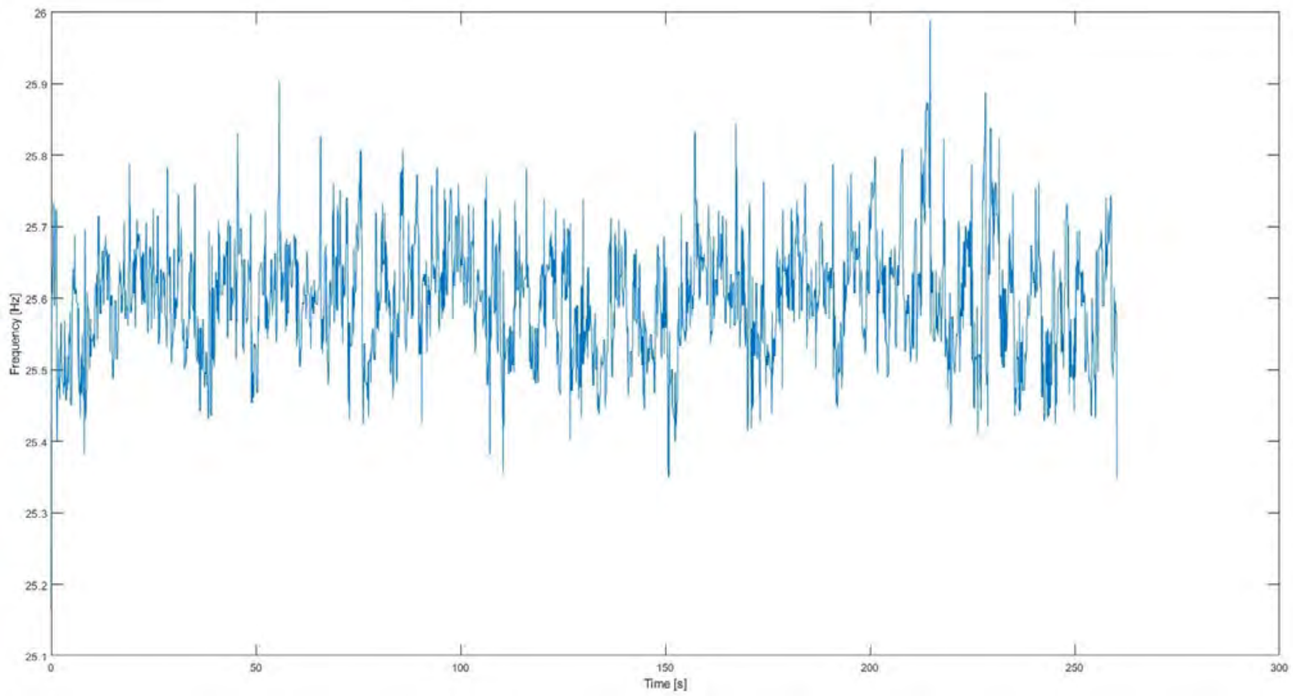


Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

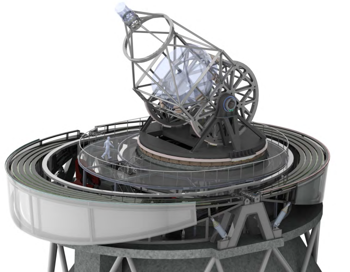
Solved!

Situation: GLAO, using the multidirectional WFS:

- Squared differences + parabolic ➔
- Using 7 directions, subapertures of 25x25px, clipping 6 px per size → 13x13 px to compute the correlation (**25.6 Hz** now!)



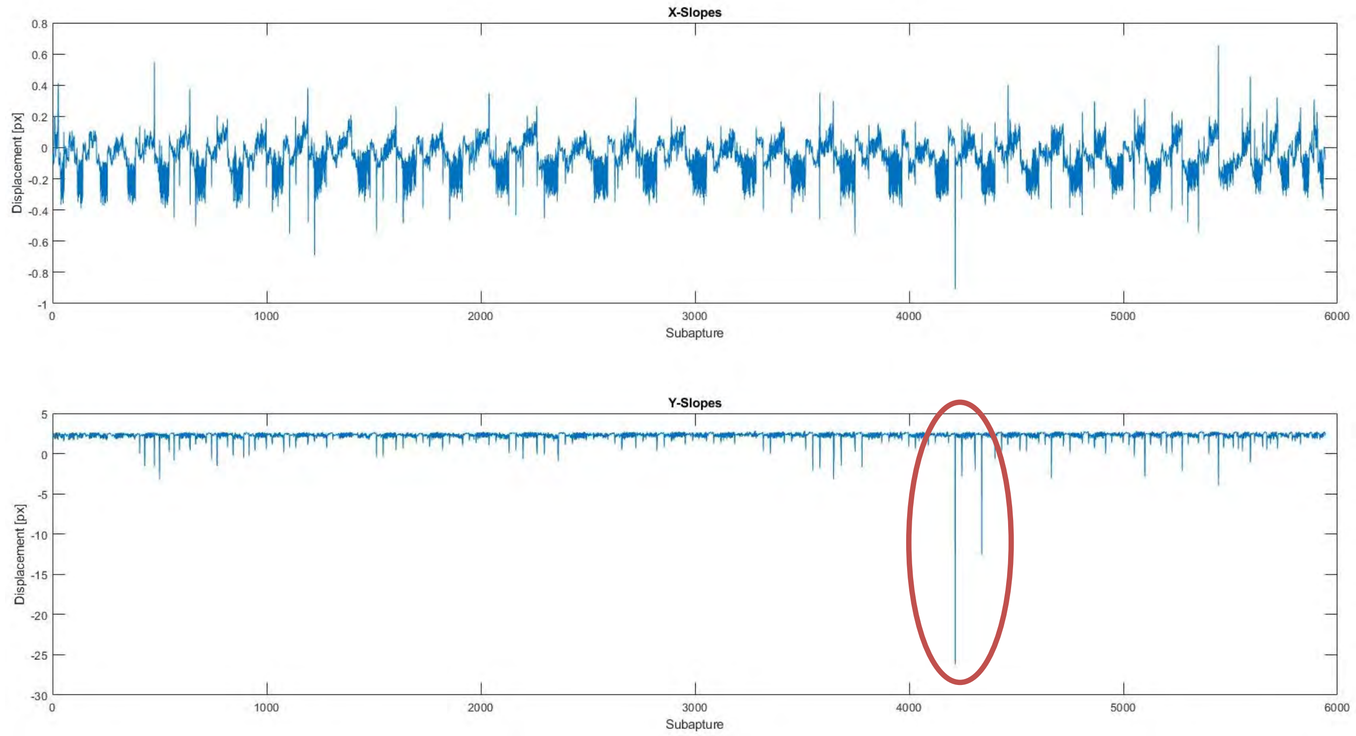
➢ However,.. What about robustness and accuracy?



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Ups

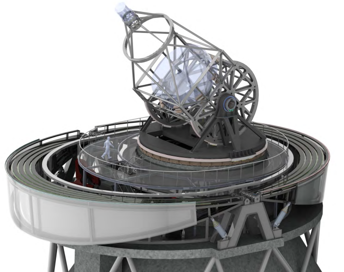
- We applied a 6 px displacement over the Y-axis using our translation table
- Some slopes measurements are ***lost***



Typical solutions:

- Discard the slopes out of the subapertures
- Change the subpixel algorithm, maybe CoG, to force the slope to be inside of the subapertures

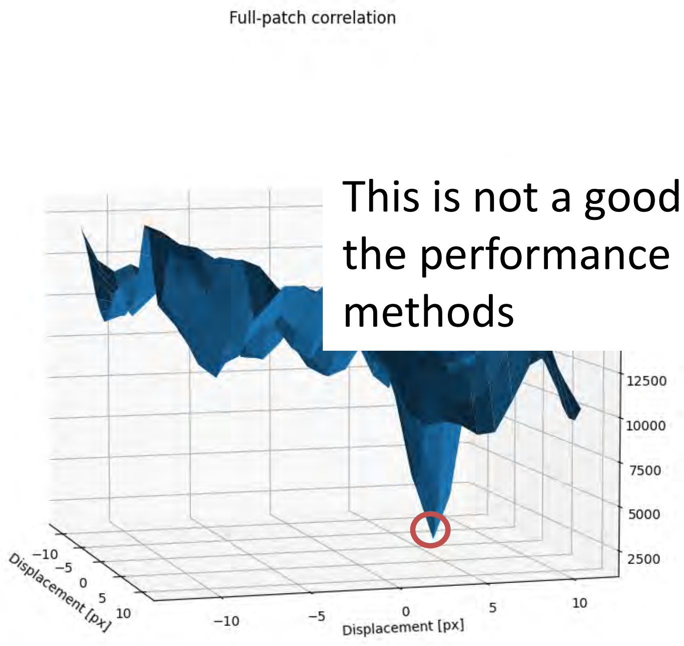
However, our purpose is to learn more about the behaviour of the algorithms



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

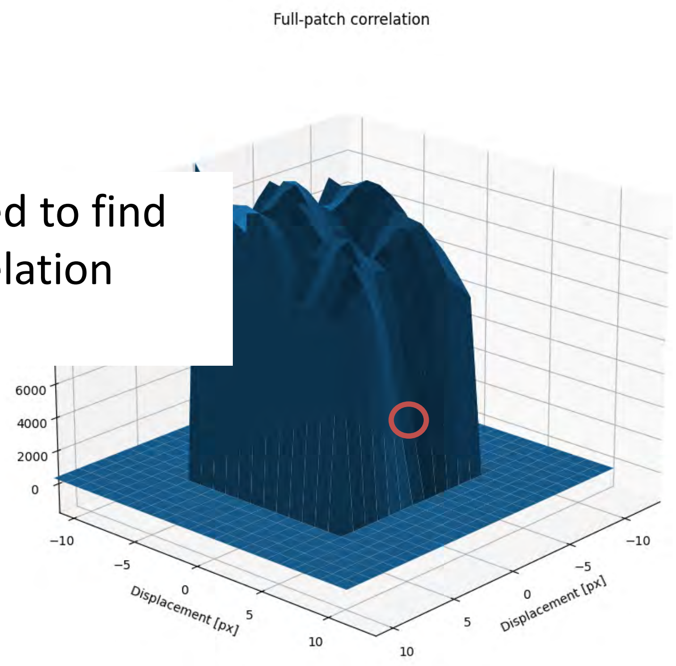
Correlation surface

- Correlation images shown as surfaces, vertex of the quadratic fit in red



Without clipping

This is not a good solution, we need to find the performance using other correlation methods



With clipping (6px)

MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

References

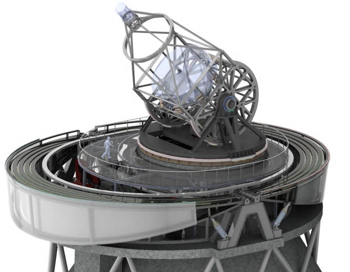
Evaluation of image-shift measurement algorithms for solar Shack-Hartmann wavefront sensor, M.G Löfdahl (2010)

- Use of artificial data to evaluate the impact of the correlation algorithms in the accuracy on the shifts estimation

Relevant conclusions for our analysis:

1. Squared differences with quadratic fit offers less systematic errors
2. Fourier based correlation tends to underestimate small shifts (< 3 px)
3. For closed loop applications, Fourier correlations might be as good as Squared differences

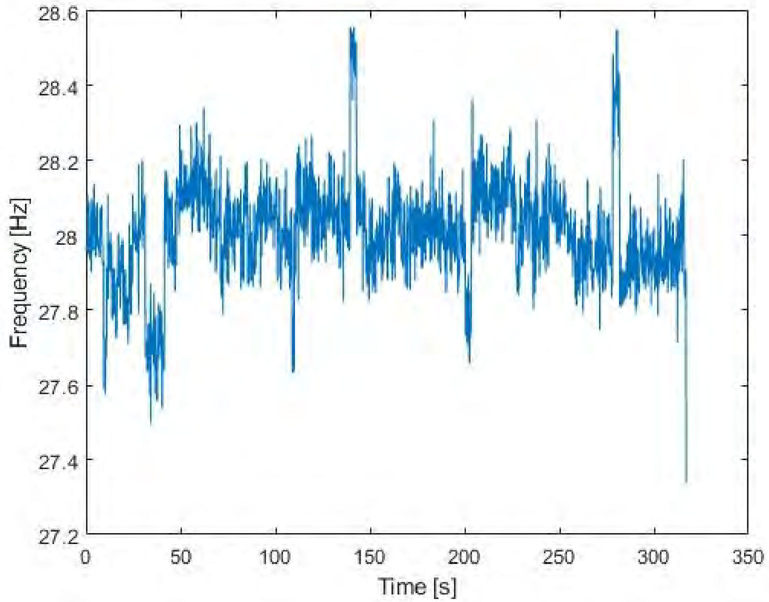
→ Let's take a look at Fourier-based correlation



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

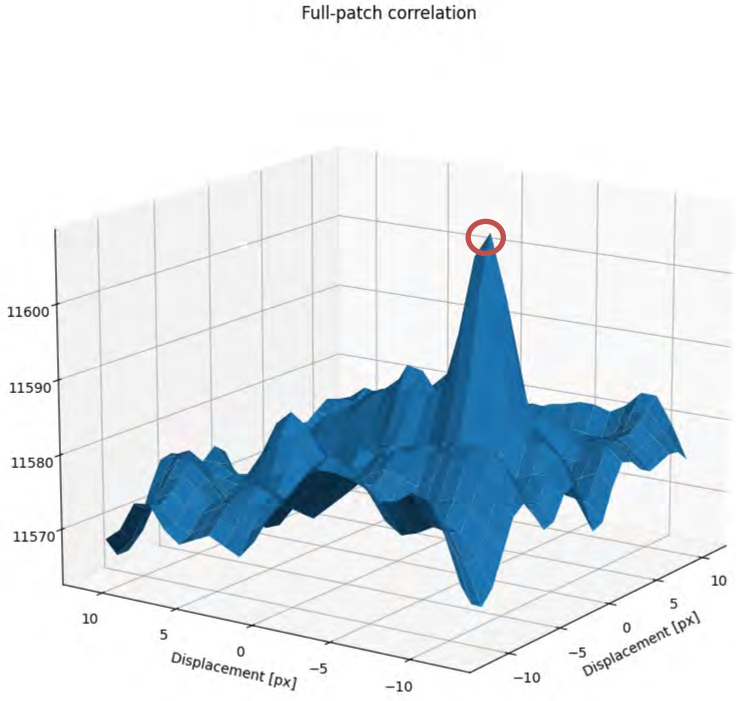
Performance & 3D

Same conditions: 25x25 px subaperture, 7 directions
Rate: 28.4 Hz (**without** clipping)

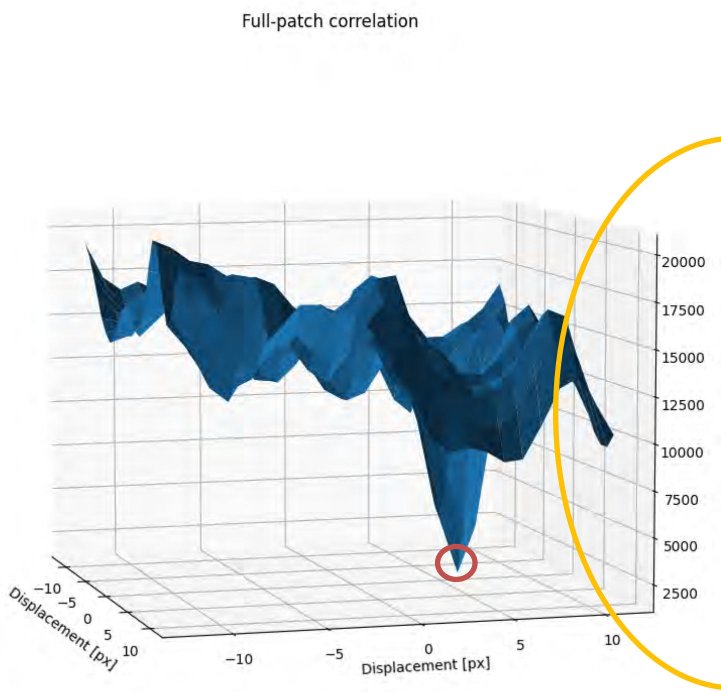


Surface for a displacement of 6 px, same as previous situation

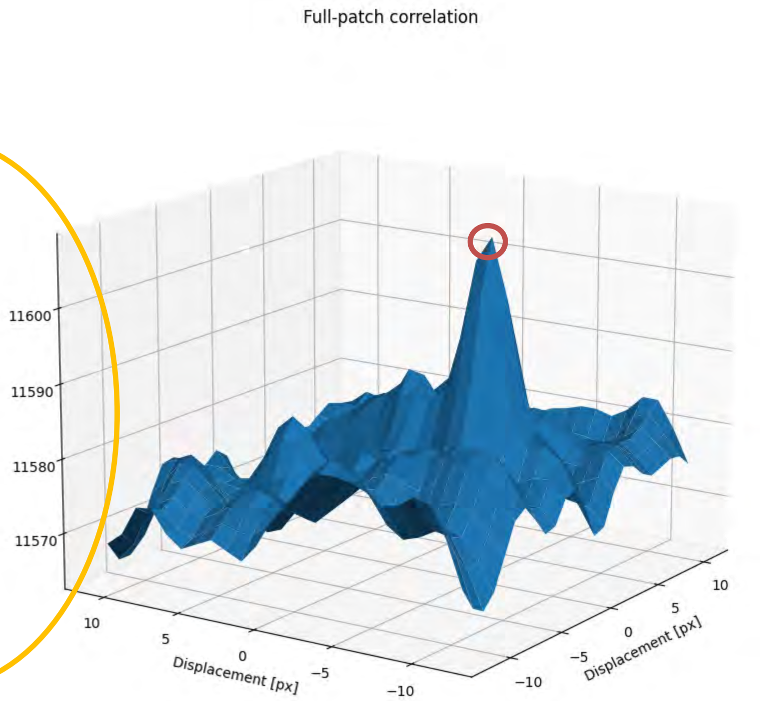
Important difference: <u>low contrast</u> in the correlation image



A comparison between the correlation images



Squared differences



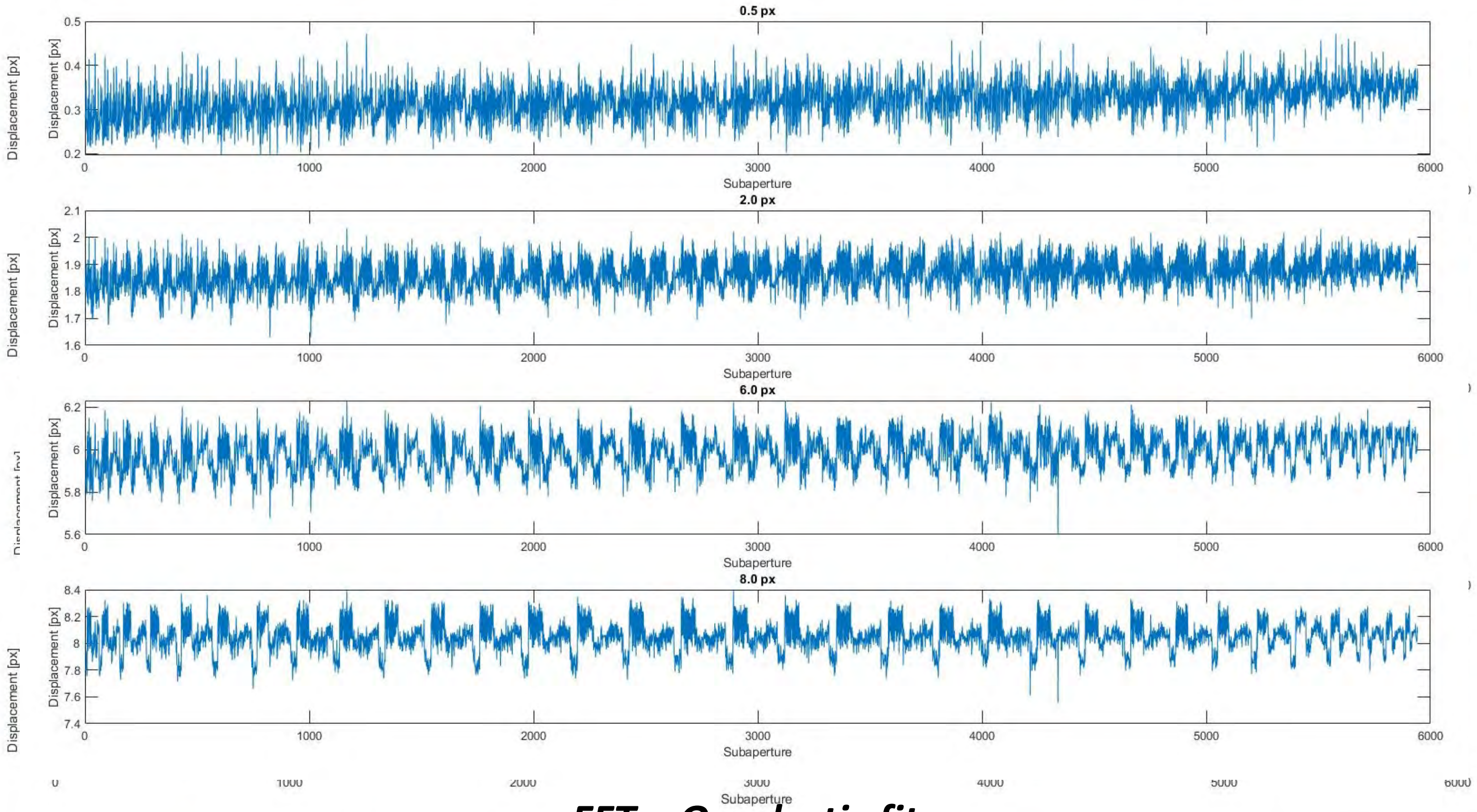
FFT

Subpixel algorithms might be influenced by this low contrasting!

Maybe this is the cause of FFT underperforming squared differences?

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

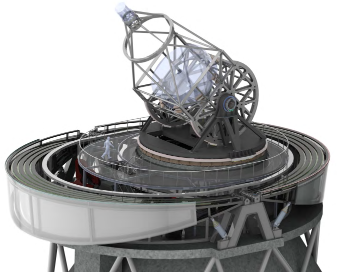
Experimental results at the test bench



FFT – Quadratic fit
Squared differences - Quadratic fit

tilt in the WFS

- Squared differences: overestimates large shift
- FFT: underestimates small shift
- Both behaviors are coherent with Löfdahl (2010)
- Small shifts are important for closed-loop!

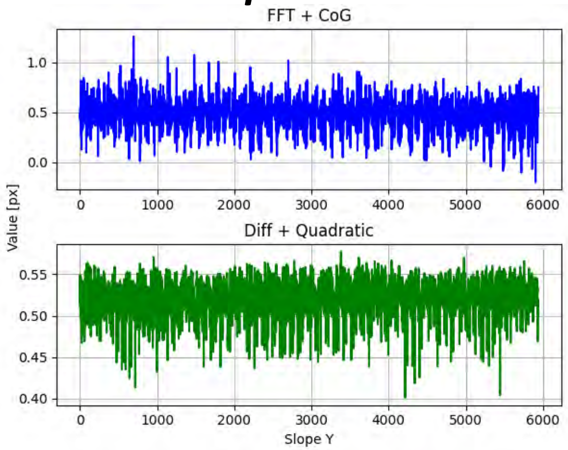


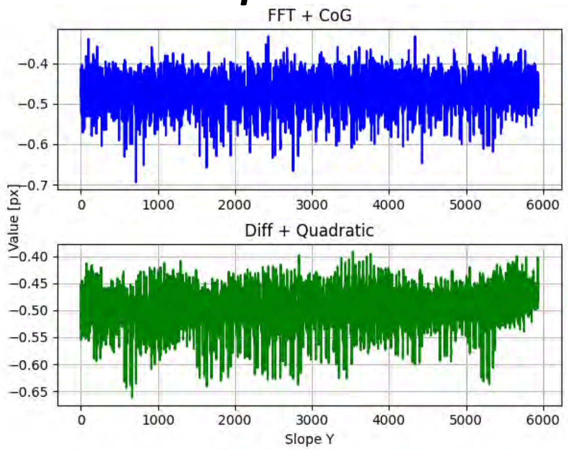
Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Contrast improvement

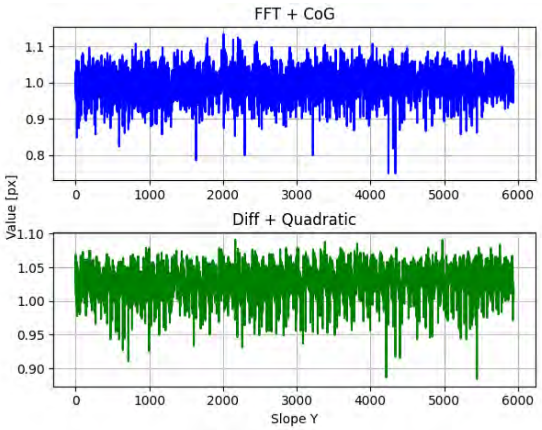
+ Displacement | **_- Displacement_**

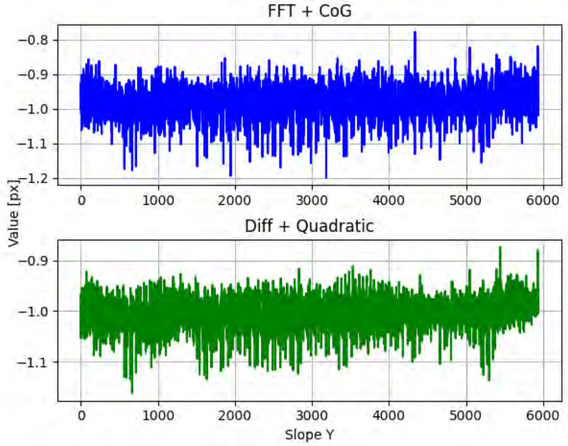
_0.5 px_





_1.0 px_



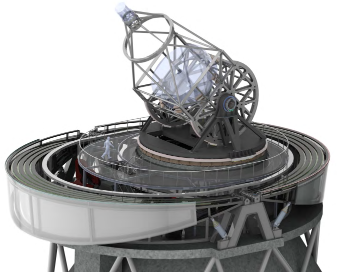


Steps

- Length normalization
- Correlation background removal → take N highest valued pixels of the correlation image

Finally, CoG will be effective for the resulting image (without background)

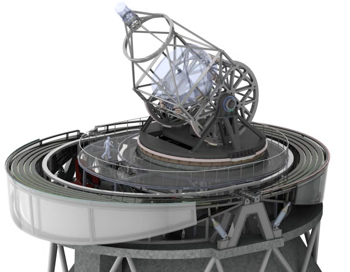
- Result similar to Squared Differences, very accurate with the real displacement
- Spikes can be found in certain subapertures, should not be relevant for control performance
- Number of pixels should be picked carefully



Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Wrap up

- Correlating large images requires a deeper analysis on correlation algorithms behavior
- We have tested the two classical algorithms for correlating solar images: squared differences and FFT, as well as the two main subpixel algorithms CoG and Quadratic fit.
- The experimental behavior of both algorithms is coherent with simulation results of previous studies
- By understanding the contrasting problems of FFT we have developed a simple method, easy and robust to implement in any system, achieving the same performance as squared differences, the best classical method (widely used)



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU
Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
Gobierno de Canarias
Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información
Canarias avanza con Europa
European Commission
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

european solar telescope

Thanks!

European Commission

Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Gobierno de Canarias

Consejería de Economía, Conocimiento y Empleo
Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información

Canarias avanza con Europa

MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia