SOMMARIO

Gli strumenti ottici che vengono utilizzati nelle missioni spaziali risentono delle variazione delle condizioni ambientali, per questo è necessario studiare l'effetto di queste ultime sull'equipaggiamento.

In particolare gli strumenti ottici sono molto sensibili alle variazioni di temperatura, perché questa grandezza può causare la deformazione e il disalinneamento delle ottiche, inoltre può comportare l'insorgere di tensioni rilevanti che possono provocare la loro rottura.

In questa tesi sono state effettuate delle analisi termo-elastiche utilizzando un software ad elementi finite (Nastran) riproducendo le condizioni operative in cui si troverà la stereocamera coinvolta nella missione BepiColombo. I risultati delle analisi sono stati elaborati in MATLAB per determinare le equazioni matematiche delle superfici degli elementi ottici deformati utilizzando un'ottimizzazione non lineare ai minimi quadrati, e considerando equazioni polinomiali, sferiche e planari.

Le superfici matematiche sono state importate in un software raytrace (ZEMAX) per poter verificare la performance ottica dello strumento. I risultati mostrano come le variazioni di temperatura influenzino gli Spot Diagrams, la Diffraction Ensquare Energy e le curve MTF.

Per migliorare la risposta del telescopio ai carichi termici sono stati ideati dei vincoli cinematici, il loro utilizzo compromette molto meno la performance della stereocamera rispetto a vincoli rigidi per le ottiche.

È stata valutata l'influenza delle variazioni dei parametri ottici (focale, spostamento del centro ottico, spostamento degli Spot Diagrams sul piano immagine e distorsioni) sulla ricostruzione della profondità della superficie di Mercurio utilizzando la propagazione dell'incertezza secondo le metodologie GUM e Monte Carlo.

Infine è stato ideato unsetup strumentale per determinare gli spostamenti e le rotazioni di alcuni elementi ottici della sterocamera in camera di vuoto riproducendo le condizioni operative dello strumento.

EXTENDED ABSTRACT

Mercury has anomalous geophysical characteristics and enigmatic geologic attributes.

The BepiColombo mission, under development by the European Space Agency (ESA) and Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) joint project, will follow the MESSENGER (National Aeronautics and Space Administration) mission presently in flight to Mercury. The determination of surface mineralogy and the origin of geologically significant morphologic features are among the primary objectives of both missions.

The BepiColombo integrated observatory-system (SIMBIO-SYS) selected for BepiColombo and dedicated to the geologic exploration of Mercury's surface, to resolve the spectroscopic features diagnostic of rock forming minerals.

To achieve the mission objectives, the orbits of the module of SIMBIO-SYS (mpo) will be in a slightly elliptical polar orbit with periherm and apoherm altitudes of 400km and 1500km and 2,3 hours orbital period.

The MPO orbital characteristics are mainly determined by the need for the remote sensing instruments to have high spatial resolution not changing to much all over the surface during the one year nominal mission

lifetime, and they are extremely challenging due to the thermal constraints on the S/C. For a continuous observation of the planet surface during the mission, the S/C is 3-axis stabilized with the Z-axis, corresponding to payload boresight direction, pointing to nadir.

However, SIMBIO-SYS consists of a suite of integrated sensors, including the Stereo Camera (STC) with broad spectral bands in the 400–900nm range and medium spatial resolution (up to 50m), and the visible-near infrared hyperspectral imager (VIHI) with high spectral resolution in the 400–2000nm range and spatial resolution up to 100m.

The geomorphological information provided by STC will therefore allow the identification of different objects within the larger footprint of VIHI, helping the interpretation of the hyperspectral spectrum of the mixed signal in VIHI pixel.

STC is a double wide angle camera designed to image each portion of the Mercury surface from two different perspectives, providing panchromatic stereo image pairs required for reconstructing the Digital Terrain Model (DTM) of the planet surface. In addition, it has the capability of imaging some portion of the planet in four different spectral bands.

The main scientific requirement for the STC is to provide the global panchromatic coverage of the surface and secondly to study selected areas in predefine spectral bands. Both imaging tasks should be

accomplished with a mean scale of 110m/px (minimum of 50m/pixel at the equator). The spectral bands have been chosen with the aim of studying surface composition and defining the main geological units.

The overall camera requirements are reported in Tab.1. The scale factor and the swath at periherm have been defined to be able to map the whole Mercury surface during the mission lifetime. For reaching the required 80m vertical accuracy in the DTM, a standard satellite stereo imaging solution has been chosen, with two panchromatic sub-channels looking at ±20° from nadir. The required optical performance of STC is expressed in terms of the Ensquared Energy (EE) inside one pixel, or alternatively in terms of the Modulation Transfer Function (MTF) at the detector Nyquist frequency.

Tabel 1 – STC requirements.

Scale factor	50 m/px at periherm
Swath	38 km at periherm
Stereoscopic properties	±20° stereo angle with respect to nadir both images on the same detector
Vertical accuracy	80 m
EE **MTF**	> 70% inside 1 pixel > 60% at Nyquist frequency
Wavelength coverage	410-930 nm (5 filters)
Filters	panchromatic (700 ± 100 nm) 420 ± 10 nm 550 ± 10 nm 750 ± 10 nm 920 ± 10 nm

The desired 50m/px scale factor at periherm is reached with a 90mm effective focal length, considering the 10microns pixel size of the Si_PIN hybrid detector chosen.

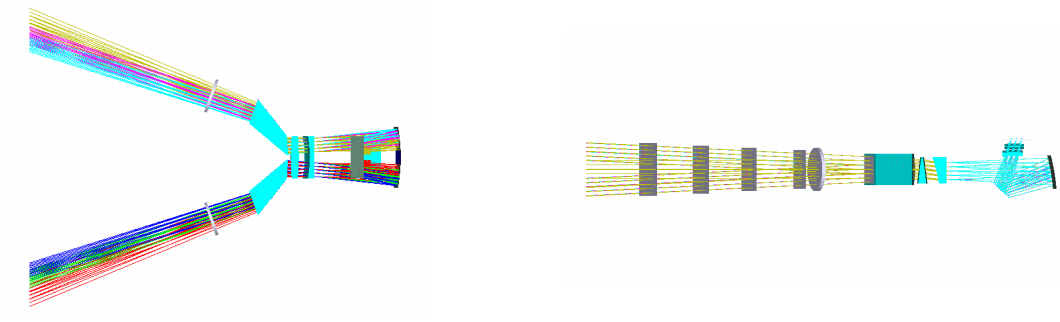
The adopted telescope optical solution (see Fig.1) is a novel design, in which a couple of rhomboid prisms redirects the ±20° wide open beams along directions much closer to the system optical axis.

After the two prisms, a modified Schmidt telescope follows, in which a correcting doublet positioned at about half distance between the spherical mirror M1 and its center of curvature replaces the classical Schmidt correcting plate. Finally, a field correcting system has been included just in front of the detector.

The nominal FoV of each sub-channel is 5.3° x 4.5° subdivided in 3 narrow strips, one for each filter, covering three quasi-contiguous areas on Mercury surface.

The prisms and the lenses will be made of Fused Silica radhard glasses; the reflection of the beam inside the prism takes advantage of the total internal reflection at the glass-air interface.

The two mirrors will be made of Alluminum Alloy 7075-T6, the same material of the STC structure.



(a) (b)

Figure 1 – STC raytrace scheme.

The optical characteristics of the camera are summarized in Tab.2.

Tabel 2 – STC requirements.

Optical concept	Catadrioptic: modified Schmidt telescope plus rhomboid prisms and field corrector
Stereo solution (concept)	2 identical optical channels Detector and most of the optical elements common to both channels
Focal length (on-axis)	90mm
Pupil size (diameter)	15mm
Focal ratio	f/6
Mean image scale	23 arcsec/px (111 μrad/px)
FoV (cross track)	5.3°
FoV (along track)	2.4° pancromatic 0.4° color filters
Detector	Si_PIN (format: 2048 x 2048; 10μm squared pixel) 14 bits dynamic range

The spot diagrams and the relative EE for the panchromatic filter are shown respectively in Fig.2 and Fig.3.a. It can be seen that the spots are well within the overlaid box having the 10μm square pixel size of the foreseen detector; a small lateral colour residual is present in one corner of the field, but it has been verified to be less than 1/3rd of a pixel, that is completely tolerable.

The EE including diffraction effects is of the order of 80% all over the FoV of each filter.

The mean MTF, at the Nyquist frequency of 50cycle/mm, is of the order of 60-70%. As an example, the mean MTF for the panchromatic filter is shown in Fig.3b.

The orbiting around Mercury planet will be dangerous for STC camera, because the planet is very near to the Sun, and this fact has an impact on the temperature's variations during the instrument's operation.

The operative temperature range had been estimated between -20°C and 30°C. The integration temperature is assumed to be 20°C.

The optical instruments are very sensitive to temperature's variations, because it can change the distances and inclinations between the optics and provoke their misalignment.

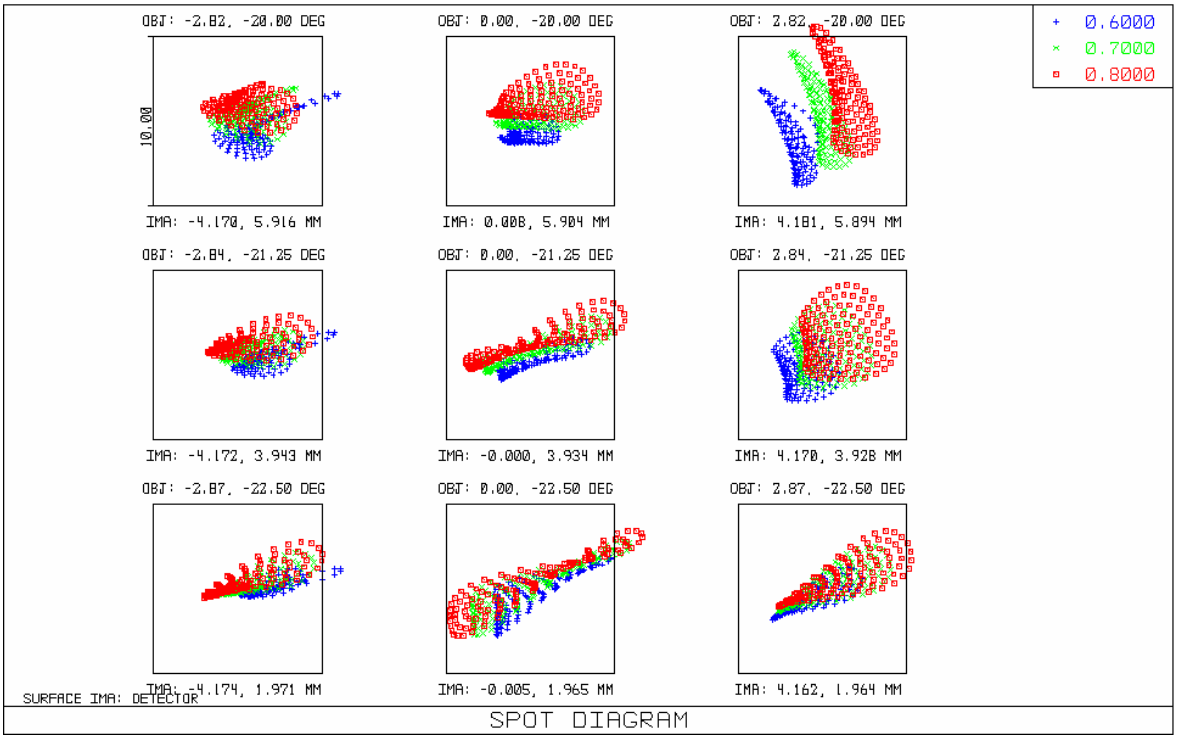
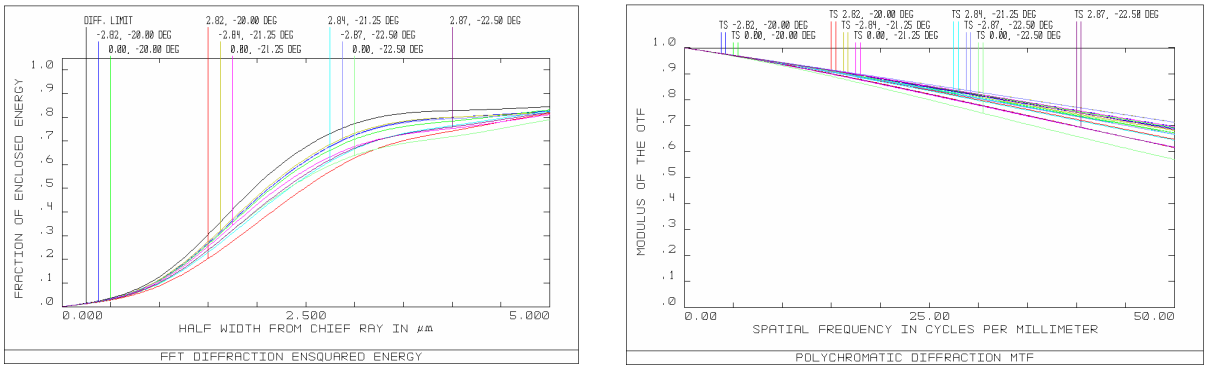


Figure 2 – STC Spot Diagrams: panchromatic filter.



(a) (b)

Figure 3 – STC Diffraction Ensquared Energy (a) and MTF curves (b): panchromatic filter.

This fact can reduce the performance of the camera in terms of Diffraction Encircled Energy, MTF

curves, Spot Diagrams and Distortions. However it's possible an alteration of the camera intrinsic parameters, with the introduction of an uncertainty on stereoscopic vision that can be assimilated on the 3D reconstruction of Mercury surface.

For this reason in this thesis an original work had been done to determine the influence of thermal loads on STC performance.

A new method is presented to solve this problem (see Fig.4).

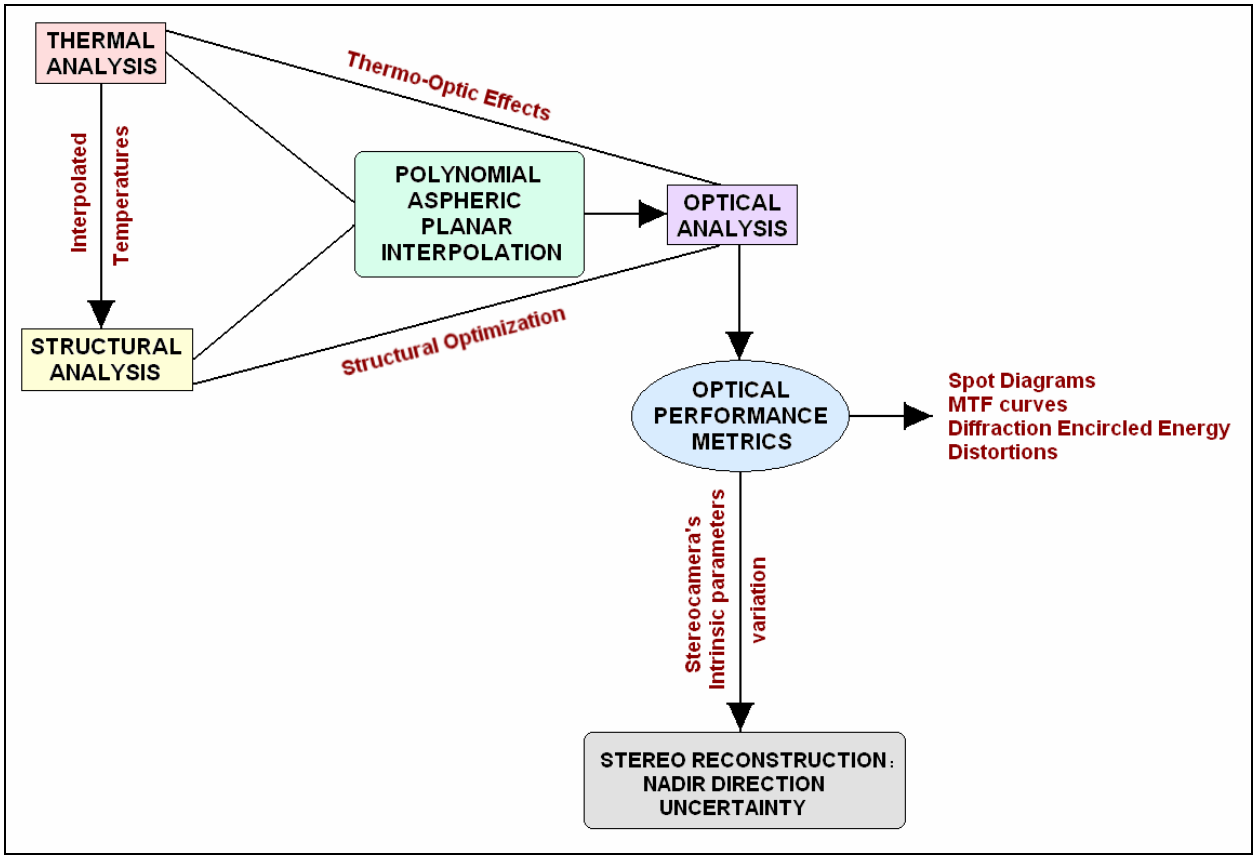


Figure 4 – Method's scheme to study the effects of thermal loads on streocamera's performance.

The method can be resume in some steps:

- Thermo-elastic analysis of STC introducing the constraints and the thermal load;
- Elaboration of the results of FEA analysis to determine the mathematical equation of the shapes of the optics; conversion of FEA units to optics units and converting results to optical coordinate systems;

- Importation of the optics mathematical formulas in a ray-trace code like Zemax to determine Spot Diagrams, MTF curves, Diffraction Encircled Energy and Distortion;
- Uncertainty propagation considering ray-trace results on 3D reconstruction software.

The integrated optomechanical analysis to predict performance require that finite element analysis (FEA) results be accurately passed to optical analysis programs. Rigid body motions of optics are input using one file format, whereas elastic distortions are typically described as polynomials or aspheric and planar surfaces in a separate file.

To determine the mathematical equations of surfaces has been used an algorithm base on Non-linear Least Square Data Fitting. This the form of least squares analysis which is used to fit a set of observations with a model that is non-linear. It is used in some forms of non-linear regression. The basis of the method is to approximate the model by a linear one and to refine the parameters by successive iterations.

Consider a set of m data points, (x_1, y_1), (x_2, y_2), …, (x_m, y_m), and a curve (model function) $y=f(x,\beta)$, that in addition to the variable x also depends on n parameters $\beta=(\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n)$, it is desired to find the vector β of parameters such that the curve fits best the given data in the least squares sense, that is, the sum of squares:

$$S = \sum_{i=1}^{m} r_i^2 \tag{1}$$

is minimized, where the residuals (errors) r_i are given by:

$$r_i = y_i - f(x_i, \beta) \tag{2}$$

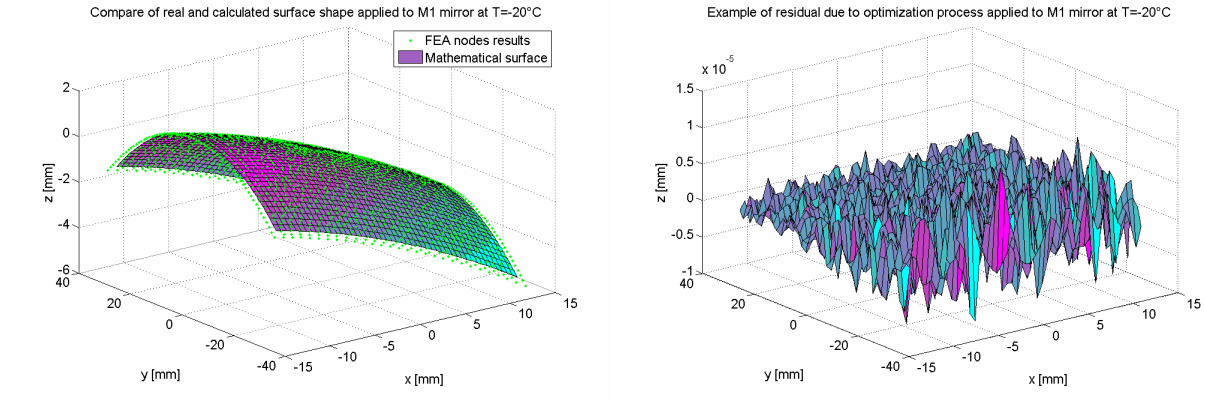
for i=1, 2, …, m.

In Fig.5 is possible to see an example to compare the real optics shape with the calculated sag and the residual of the computing for the front surfaces of one of the lenses of the stereocamera for SIMBIO-SYS.

As told before the results are the variations of optical parameters as a consequence of the thermal loads and optics constraints.

These values allow to determine the uncertainty on 3D reconstruction deep considering two optical channels and a triangulation algorithm. The uncertainty has been evaluated using Guide to the Expression

of Uncertainty in Measurement (GUM) and Monte Carlo calculations: the results are similar, but the uncertainty determined by the help of the second method is a little bigger.



(a) (b)

Figure 5 – Example of surface interpolation using Nonlinear Least Square algorithm applied to the shape of M1 mirror: (a) sag interpolation; (b) residuals.

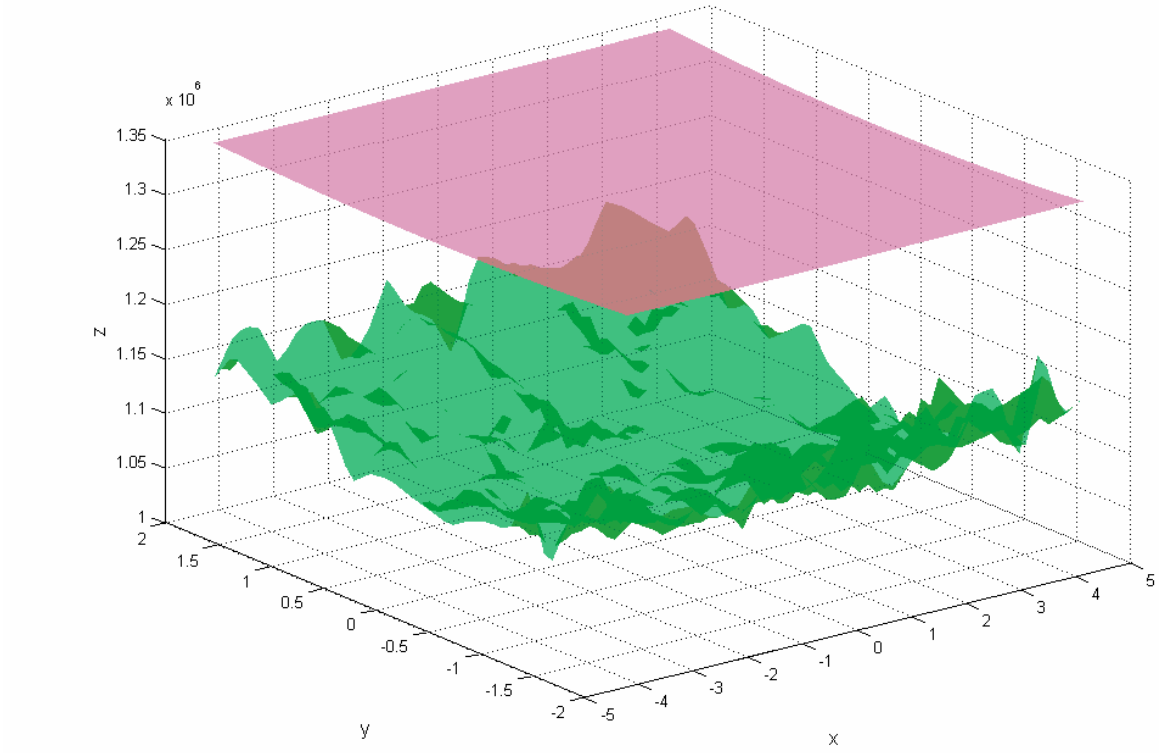
The results show that considering bond constraints the most critical optical elements are the prisms, they decrease the performance of the telescope in terms of Spot Diagrams, because their size became bigger and their central point translate too much on the detector, of MTF and Diffraction Ensquared Energy, and of distortions.

Using kinematic constraints is very important to preserve stereocamera's features at different temperatures, in this case the worst optical elements are the two mirrors in terms of Spot Diagrams decreasing. For this reason has been considered a type of instrumented setup to measure the misalignment of the two mirrors of the stereocamera.

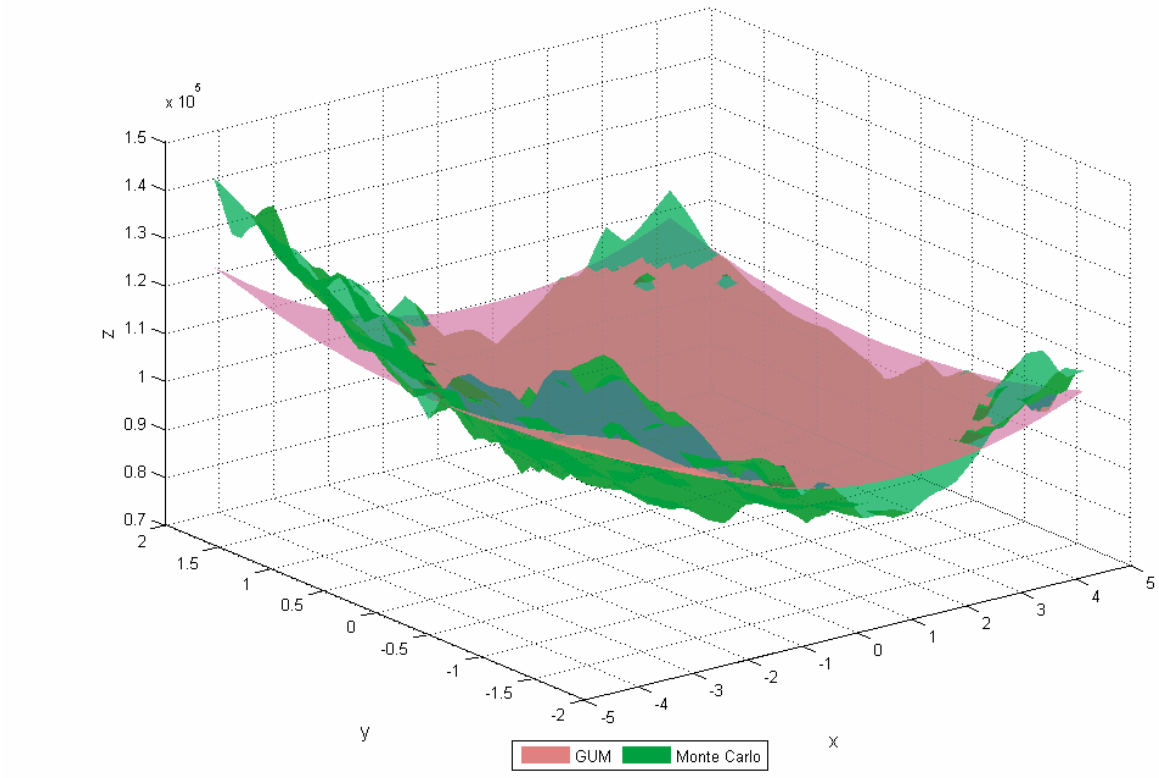
This is a problem of measure of displacements and rotations without contact between the sensor and the target. It has been studied the application of eddy-current sensors near the two mirrors to proceed in vacuum chamber.

The continuous changes on stereocamera's design have caused the impossibility to carry out the measurements, and finally it has only been tested the misalignment of M2 mirror using laser vibrometer.

The result of raytrace analysis has been used to determine their influence of the 3D reconstruction of the surface of Mercury. It has been calculated the uncertainty with the help of GUM and Monte Carlo methods. The results show that the use of kinematic constraints helps to decrease uncertainty (see Fig.6).



(a)



(b)

Figure 6 – Example of uncertainty on Mercury's surface deep at T=-20°C: (a) glue constraints; (b) kinematic constraints.

INDICE

Capitolo I - L'Ambiente spaziale: il pianeta Mercurio **1**
I.1 Introduzione 1
I.2 Caratteristiche di Mercurio 1
I.2.1 Parametri orbitali 3
I.2.2 Caratteristiche fisiche 5
I.2.3 L'atmosfera 6
I.2.4 La superficie 8
I.2.5 La struttura interna 10
I.2.6 Il campo magnetico 11
Capitolo II - La missione BepiColombo e SIMBIO-SYS **13**
II.1 Dettagli della missione 13
II.2 Obiettivi della Missione 15
II.3 I Componenti della missione 17
II.3.1 MPO (Mercury Planetary Orbiter) 17
II.3.2 MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) 19
II.4 SIMBIO-SYS 21
II.5 High-Resolution Imaging Camera (HRIC) 23
II.6 La stereo camera (STC) 23
II.7 Visual and Infrared Hyper-spectral Imager (VIHI) 24
II.8 Principio di funzionamento 24
II.9 Sinergie tra gli strumenti italiani 25

Capitolo III - La stereocamera di SIMBIOSYS **27**
III.1 STC: Stereo Imaging Channel 27
III.2 Visione stereoscopica di STC 28
III.3 Configurazione ottica di DI STC 30
III.4 Il sensore della stereocamera 32
III.5 Prestazioni ottiche della stereocamera 34
III.6 Design opto-meccanico della stereocamera 34

Capitolo IV - Analisi termo-elastiche della stereocamera **38**

IV.1 Scopo delle analisi termo-elastiche 38
IV.2 AnalIsi termo-elastiche con vincolo colla 40
IV.3 Analisi termo-elastiche con vincoli cinematici 41
IV.3.1 Vincoli cinematici applicati alle lenti ed ai prismi 41

Capitolo V - Conversione dei risultati delle analisi termo-elastiche in superfici matematiche per analisi raytrace 45
V.1 Possibili integrazioni tra codici fem e raytrace 45
V.2 Ottimizzazione non-lineare ai minimi quadrati per la determinazione delle equazioni delle superfici dell'ottica 45
V.2.1 Superfici importabili in Zemax 46
V.3 Risultati di calcolo delle superfici 47

Capitolo VI - Analisi ottiche mediante codice raytrace 55
VI.1 Introduzione alle analisi ottiche 55
VI.2 Spot diagrams 55
VI.2.1 Spot Diagrams: elementi ottici incollati alla struttura 56
VI.2.2 Spot Diagrams: vincoli cinematici 60
VI.3 Diffraction Ensquare Energy 62
VI.3.1 Diffraction Ensquare Energy: elementi ottici incollati alla struttura 62
VI.3.2 Diffraction Ensquare Energy: vincoli cinematici 65
VI.4 Curve MTF 66
VI.4.1 Curve MTF: elementi ottici incollati alla struttura 67
VI.4.2 Curve MTF: vincoli cinematici 69
VI.5 Distorsioni 71
VI.6 Considerazioni finali 72

Capitolo VII - Valutazione dell'incertezza relativa alla profondità della superficie di Mercurio 73
VII.1 Modello pin-hole della telecamera e variazione dei parametri intrinseci 73
VII.2 valutazione dell'incertezza sulla profondità della superficie 73
VII.2.1 Metodo GUM 74
VII.2.2 Metodo Monte Carlo 76
VII.2.3 Risultati 77

Capitolo VIII - Setup strumentale per la determinazione degli spostamenti e delle rotazioni all'interno della stereocamera **88**

VIII.1 Grandezze da misurare e condizioni operative 88

VIII.2 Setup sperimentale per la taratura della stereocamera 90

VIII.2.1 Considerazioni preliminari 90

VIII.2.2 Sensore idoneo allo svolgimento delle misurazioni 92

VIII.2.3 Allestimento del setup strumentale 94

VIII.2.3.1 Caratteristiche dei portaspecchi 94

VIII.2.3.2 I dispositivi porta sensori 98

VIII.2.3.3 Lega SuperInvar 32-5 98

VIII.2.3.4 Progettazione meccanica dei porta sensori 100

VIII.2.4 Pre-taratura del sensore in camera di vuoto 102

VIII.3 Svolgimento delle misurazioni 103

Conclusioni **104**

Bibliografia **105**

INDICE DELLE FIGURE

Figura I.1: Il pianeta Mercurio nel sistema solare. 2
Figura I.2: Moto di Mercurio attorno al Sole. 4
Figura I.3: Distribuzione del Sodio nell'atmosfera di Mercurio. 7
Figura I.4: Formazione dei rilievi in seguito a impatti con meteoriti. 9
Figura I.5: Immagini della superficie di Mercurio:il cratere Zola, a sinistra, il cui diametro è pari a 60 km. A destra si riporta un'immagine della superficie realizzata dal Mariner 10. 9
Figura I.6: Schematizzazione grafica delle attuali conoscenze su Mercurio. 12
Figura II.1: Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si possono vedere i due componenti principali: MPO (Mercury Planetary Orbiter) e MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter). 14
Figura II.2: Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si può il modulo MPO (Mercury Planetary Orbiter). 18
Figura II.3 – Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si può il modulo MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter). 20
Figura II.4: SIMBIO-SYS (Spectrometer and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System). 22
Figura II.5: SIMBIO-SYS (Spectrometer and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System). 23
Figura III.1: STC push-frame imaging della superficie di Mercurio. 28
Figura III.2: STC push-frame imaging della superficie di Mercurio. 29
Figura III.3: Metodo di acquisizione delle immagini. 30
Figura III.4: Filtri e Fields of View della stereocamera. 35
Figura III.5: Particolari del disegno opto-meccanico della stereocamera: (a) disegno complessivo comprensivo dei baffles esterni; (b) parte della stereocamera compresa nella struttura più interna in lega di alluminio. 36
Figura III.6: Particolari degli elementi ottici della stereocamera: (a) disegno ottico complessivo comprensivo dei baffles esterni; (b) parte delle ottiche della stereocamera comprese nella struttura più interna in lega di alluminio. 36
Figura III.7: Ray-trace della stereocamera: (a) vista dall'alto; (b) vista di profilo. 37
Figura IV.1: Particolari dei componenti di montaggio delle ottiche della stereocamera. 39
Figura IV.2: Traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincolo colla da 40

Ti=20°C a Tf=30°C.

Figura IV.3: Traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincolo colla da Ti=20°C a Tf=-20°C. 41

Figura IV.4: Particolari dei vincoli cinematici applicati alle lenti (a) ed ai prismi (b) della stereocamera. 43

Figura IV.5: Particolari delle traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincoli cinematici applicati alle lenti: (a), (b) da Ti=20°C a Tf=30°C; (c), (d) da Ti=20°C a Tf=-20°C. 43

Figura IV.6: Particolari delle traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincoli cinematici applicati ai prismi: (a), (b) da Ti=20°C a Tf=30°C; (c), (d) da Ti=20°C a Tf=-20°C. 44

Figura V.1: Schema del metodo utilizzato per importare in Zemax i risultati delle analisi termo-elastiche. 47

Figura V.2: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la prima superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un piano. 47-48

Figura V.3: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la seconda superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 48

Figura V.4: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la terza superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 49

Figura V.5: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la quarta superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 49-50

Figura V.6: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie davanti della prima lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a 50

Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.

Figura V.7: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dietro della prima lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 51

Figura V.8: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie davanti della seconda lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 51-52

Figura V.9: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dietro della seconda lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 52

Figura V.10: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dello specchio M1: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20. 53

Figura V.11: Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dello specchio M1: (a) confronto tra superficie iniziale a Ti=20°C e a Tf=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a Tf=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da Ti=20°C e a Tf=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a Tf=-20°C mediante l'equazione di un piano. 53-54

Figura VI.1: Spot Diagrams della stereocamera a T=20°C, canale pancromatico. 56

Figura VI.2: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 57

Figura VI.3: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 57

Figura VI.4: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di sole lenti vincolate tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 58

Figura VI.5: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 58

Figura VI.6: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 59

Figura VI.7: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 59

Figura VI.8: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di lenti e prismi vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 60

Figura VI.9: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 61

Figura VI.10: Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di sole lenti vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico. 61

Figura VI.11: Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=20°C e canale pancromatico: (a) smax=50μm; (b) smax=5μm. 62

Figura VI.12: Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico smax=5μm: (a) effetto di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio; (b) effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio; (c) effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio. 63

Figura VI.13: Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico smax=5μm: (a) effetto dello specchio M1; (b) effetto dello specchio M2; (c) effetto di entrambi gli specchi M1 e M2. 64

Figura VI.14: Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico smax=5μm: (a) effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente; (b) effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente; (c) effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente. 65-66

Figura VI.11: Curve MTF della stereocamera a T=20°C e canale pancromatico: (a) fmax=287,76Hz; (b) fmax=50Hz. 66-67

Figura VI.12: Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico fmax=50Hz: (a) effetto di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio; (b) effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio; (c) effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio. 67-68

Figura VI.13: Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico fmax=50Hz: (a) effetto dello specchio M1; (b) effetto dello specchio M2; (c) effetto di entrambi gli specchi M1 e M2. 68-69

Figura VI.14: Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico 70

fmax=50Hz: (a) effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente; (b) effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente; (c) effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente.

Figura VI.15: Esempio di distorsioni prodotte sulle immagini a T=-20°C e canale pancromatico effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente. 71

Figura VII.1: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=20°C. 78

Figura VII.2: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: prismi e lenti vincolati tramite incollaggio. 79

Figura VII.3: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio. 80

Figura VII.4: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio. 81

Figura VII.5: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dello specchio M1. 82

Figura VII.6: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dello specchio M2. 83

Figura VII.7: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: prismi e lenti vincolati cinematicamente. 84

Figura VII.8: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente. 85

Figura VII.9: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente. 86

Figura VII.10: Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo la metodologia GUM a temperatura di integrazione, a T=-20°C ed a T=30°C: effetto degli elementi ottici vincolati sia cinematicamente che mediante incollaggio. 87

Figura VIII.1: Particolare dell'interno di SIMBIO-SYS con evidenziata la disposizione degli strumenti HRIC, STC e VIHI. 89

Figura VIII.2: STC (Stereo Channel): (a) avvolta dal coperchio protettivo (in grigio scuro); (b) senza coperchio protettivo. 89

Figura VIII.3: Interno dell'STC con illustrati i componenti ottici e di supporto. 90

Figura VIII.4: Sensore NC-DVRT-1.0 prodotto da Microstrain. 92

Figura VIII.5: Schema di funzionamento del sensore di spostamento NC-DVRT-1.0. 93

Figura VIII.6: Allestimento del setup strumentale in camera di vuoto, si possono notare la piastra presente in camera di vuoto, la piastrina che verrà utilizzata per alloggiare i target ed i sensori e gli strumenti ottici da analizzare. 95

Figura VIII.7: Particolare dell'interno della stereocamera: supporto per lo specchio piano (in rosa), supporto per lo specchio sferico (in giallo). 95

Figura VIII.8: Ingombri all'interno della stereocamera. 96

Figura VIII.9: Particolari dello specchio piano. 97

Figura VIII.10: Particolari dello specchio sferico. 97

Figura VIII.11: Particolari della parte superiore del porta specchio piano. 98

Figura VIII.12: Setup strumentale per rilevare lo spostamento e le rotazioni della parte superiore del supporto dello specchio piano. 100

Figura VIII.13: Setup strumentale per rilevare lo spostamento e le rotazioni dello specchio sferico. 101

Figura VIII.14: Elementi porta sensori per valutare gli spostamenti e le rotazioni: (a) dello specchio piano, (b e le rotazioni dello specchio 101

INDICE DELLE TABELLE

Tabella I.1: Parametri orbitali di Mercurio. 3
Tabella I.2: Parametri fisici di Mercurio 5
Tabella I.3: Composizione dell'atmosfera del pianeta Mercurio. 7
Tabella III.1: Caratteristiche principali della stereocamera. 31
Tabella III.2: Specifiche della stereocamera. 33
Tabella III.3: Caratteristiche del sensore della stereocamera. 34
Tabella III.4: Campi di vista della stereocamera. 35
Tabella IV.1: Temperature limite della della stereocamera. 38
Tabella IV.2: Proprietà fisiche, meccaniche e termiche della lega Aluminum 7075-T6 (fonte Matweb). 42
Tabella IV.3: Proprietà fisiche, meccaniche e termiche di Fused Silica (fonti Matweb e Schott AG Division Lithotec). 42
Tabella VII.1: Incertezza massima valutata mediante la metodologia GUM sulla determinazione della profondità della superficie di Mercurio a T=20°C ed a T=-20°C. 87
Tabella VII.2: Incertezza massima valutata mediante la metodologia GUM sulla determinazione della profondità della superficie di Mercurio a T=20°C, a T=-20°C ed a T=30°C. 87
Tabella VIII.1: Specifiche elettriche del sensore NC-DVRT abbinato alla centralina DEMOD-DVRT. 93
Tabella VIII.2: Specifiche meccaniche del sensore NC-DVRT. 94
Tabella VIII.3: Composizione delle lega Superinvar 32-5. 99
Tabella VIII.4: Proprietà fisiche e meccaniche della lega Superinvar 32-5. 99

Capitolo I

L'AMBIENTE SPAZIALE: IL PIANETA MERCURIO

I.1 INTRODUZIONE

Mercurio è uno dei pianeti del Sistema Solare meno noti. Dall'inizio dell'esplorazione planetaria, solo la sonda Mariner 10 della NASA, oltre una trentina di anni fa, ha effettuato passaggi ravvicinati a Mercurio, precisamente due volte nel 1974 e una volta l'anno successivo. Fu un risultato storico, anche perché era la prima volta che una navicella spaziale utilizzava l'assist gravitazionale di un pianeta, in quel caso Venere, per riceverne la spinta sufficiente a raggiungerne un altro.

Fu proprio lo scienziato italiano Giuseppe "Bepi" Colombo, dal quale prende il nome la missione europea, a suggerire alla NASA l'uso corretto dell'assist gravitazionale di Venere in modo da spingere la Mariner 10 in un'orbita che incrociasse Mercurio per ben tre volte nel giro di 20 mesi.

Nonostante di Mercurio si sappia ben poco, in quanto solo circa il 46% della superficie di esso è stata osservata direttamente, sia grazie alla Mariner 10 che alle osservazioni condotte da Terra, il pianeta presenta molti motivi di interesse. Innanzitutto perché fa parte di una famiglia omogenea di pianeti rocciosi come Venere, Terra e Marte; pertanto comprendendone le caratteristiche, si avrebbero indicazioni sulla formazione del Sistema Solare.

L'obiettivo è quello di scoprire se esiste un meccanismo di formazione planetaria intorno a una stella, in modo da capire meglio se la formazione di un sistema di pianeti sia peculiare, e dunque la Terra occupi un posto del tutto particolare nell'universo, oppure se il sistema solare è solo uno dei tanti angoli di universo che si assomigliano.

In altri termini, se la formazione di un sistema planetario sia o meno un fenomeno universale.

I.2 CARATTERISTICHE DI MERCURIO

Mercurio è il primo pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole e il più piccolo dei pianeti rocciosi del sistema solare interno.

Esso è caratterizzato da un raggio inferiore alla metà di quello terrestre (6378 km).

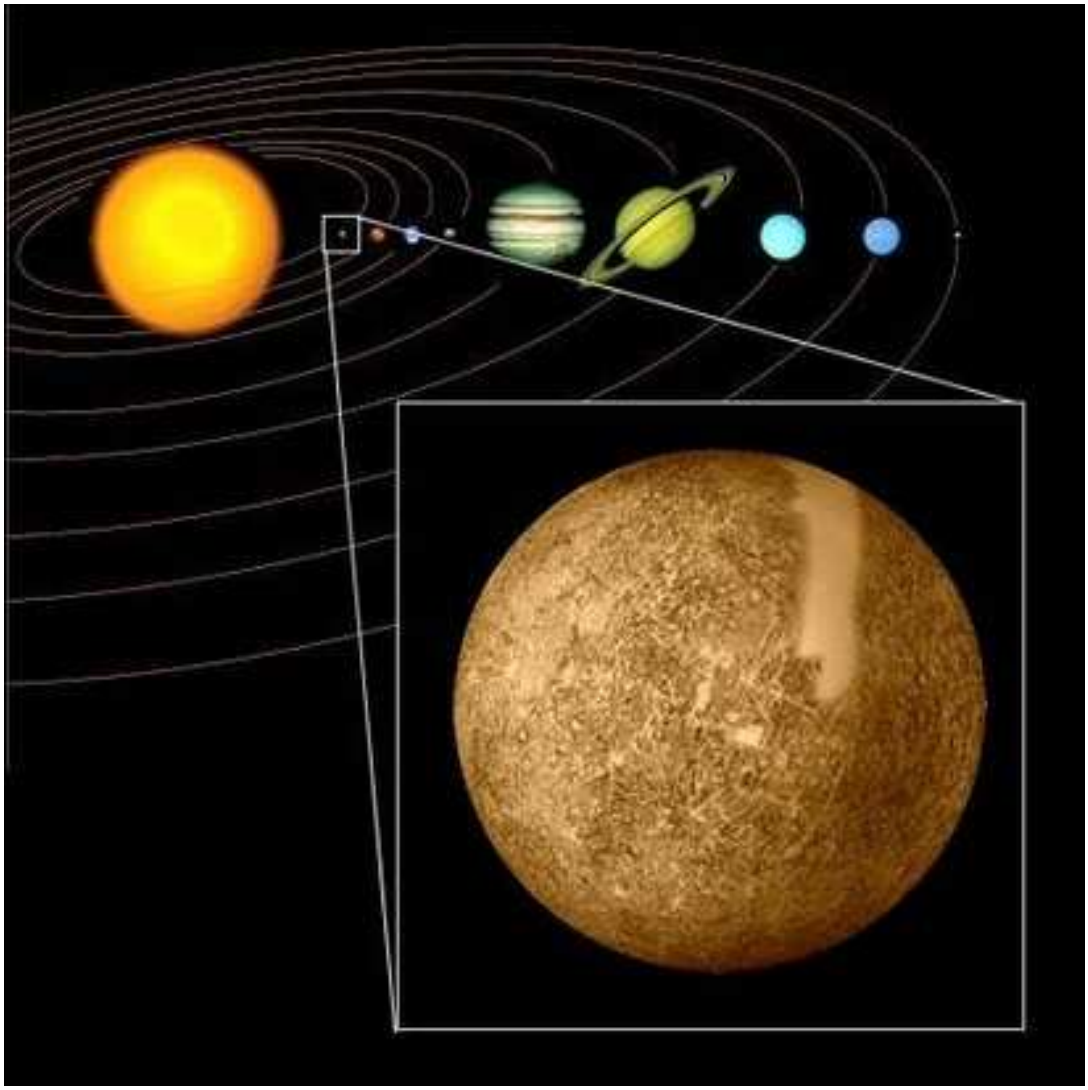


Figura I.1 - Il pianeta Mercurio nel sistema solare.

Il suo nome deriva da quello dell'omonima divinità romana; il suo simbolo astronomico consiste di una rappresentazione stilizzata del caduceo del dio.

Nelle culture dell'Estremo Oriente il pianeta è designato come l'astro dell'acqua, uno dei cinque elementi fondamentali. Era già noto alle popolazioni antiche, come gli Egizi e i Cinesi; i Sumeri lo chiamavano Ubu-idim-gud-ud; i Babilonesi, che ci hanno tramandato la prima osservazione dettagliata dei pianeti, utilizzavano i nomi gu-ad o gu-utu.

I Greci assegnarono a Mercurio due nomi: Apollo, la stella del mattino, ed Hermes, la stella della sera. La realizzazione del fatto che si trattasse di un unico pianeta è stata attribuita a Pitagora. Fino al '900 era opinione comune che in realtà esistesse un altro pianeta ancora più vicino al Sole di Mercurio, Vulcano, in seguito identificato con lo stesso corpo celeste.

Le difficoltà nell'individuarlo dipendono dalla piccola distanza dal Sole, che ne disturba sempre la

visione durante il crepuscolo o poco prima dell'alba.

Nel 1631 Pierre Gassendi fu il primo ad osservare un transito di Mercurio innanzi al Sole, secondo le previsioni fornite da Giovanni Keplero. Successivamente, nel 1639 Giovanni Battista Zupi, utilizzando un telescopio, scoprì le fasi di Mercurio, analoghe a quelle di Venere e della Luna. Questo fornì la prova definitiva che Mercurio orbita intorno al Sole.

Solo negli anni Sessanta del XX° secolo, grazie alle osservazioni radio e radar, si è calcolato con precisione il periodo di rotazione del pianeta, che prima si pensava uguale a quello di rivoluzione.

I.2.1 Parametri orbitali

I parametri orbitali di Mercurio sono i seguenti:

Tabella I.1 - Parametri orbitali di Mercurio.

Semiasse maggiore:	57909176 km 0,38709893 UA
Perielio:	46001272 km 0,30749951 UA
Afelio:	69817079 km 0,46669835 UA
Circonferenza orbitale:	360000000 km 2,406 UA
Periodo orbitale:	87,96935 giorni (0,240847 anni)
Periodo sinodico:	115,8776 giorni (0,317256 anni)
Inclinazione orbitale:	7,00487°
Eccentricità:	0,20563069
Longitudine nodo ascendente:	48,33167°
Argomento del perielio:	29,12478°
Anelli:	no

Mercurio è il pianeta più interno del sistema solare, con una distanza media dal sole di 57,91 milioni di km e una distanza minima di 45,9 milioni di km.

L'orbita risulta essere ellittica solo in prima approssimazione; è infatti soggetta a variazioni dovute alle perturbazioni da parte degli altri pianeti, prime fra tutte la precessione del perielio e il moto della linea degli apsidi, effetto che mise in difficoltà gli astronomi del XIX° secolo. Esso risulta spiegabile al

momento attuale solo tramite la teoria della relatività generale, che proprio su questo fenomeno ha avuto uno dei suoi banchi di prova.

L'orbita ha un'eccentricità di 0,2056: il pianeta si trova quindi a una distanza dal Sole compresa fra 46 milioni e 69 milioni di km, con un valore medio di 58 milioni i km (rispettivamente 0,307, 0,466 e 0,387 unità astronomiche).

Il periodo siderale di Mercurio è di 88 giorni, mentre il periodo sinodico è di 115,9 giorni.

Il piano orbitale è inclinato sull'eclittica di 7º.

La velocità media siderale del pianeta è pari a 48 km/s: si tratta della più alta fra i pianeti del sistema solare.

L'inclinazione dell'asse di rotazione di Mercurio rispetto al piano della sua orbita, pari a soli 0,1°, rende minime le variazioni stagionali di insolazione, rendendo l'equatore particolarmente caldo e le regioni polari sensibilmente fredde in qualsiasi periodo dell'anno, senza differenze apprezzabili fra i due emisferi.

A causa della grande vicinanza al Sole, i suoi periodi di rotazione e rivoluzione sono fortemente sincronizzati: il pianeta ruota su sé stesso in 58,65 giorni terrestri, pari a esattamente 2/3 del periodo di rivoluzione (circa 88 giorni terrestri). Mercurio compie cioè due rivoluzioni attorno al Sole ogni tre rotazioni attorno al proprio asse (un chiaro esempio di risonanza orbitale). In questo modo fra due passaggi successivi del Sole nella stessa posizione nel cielo mercuriano intercorrono 176 giorni terrestri; ciò, inoltre, fa sì che la durata dell'esposizione ai raggi solari per ogni punto della sua superficie sia molto elevata (176 giorni): Mercurio è il solo pianeta del sistema solare sul quale la durata del giorno, intesa come insolazione, è maggiore di un periodo di rivoluzione.

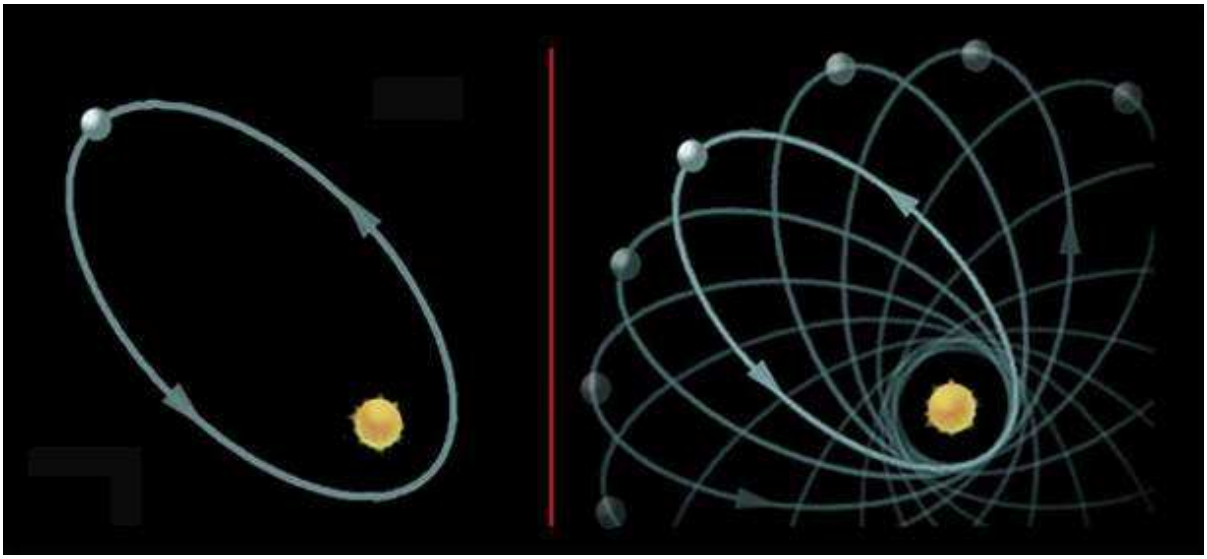


Figura I.2 - Moto di Mercurio attorno al Sole.

Un fenomeno particolare relativo a Mercurio è la cosiddetta precessione del perielio: il perielio della sua orbita ruota infatti progressivamente attorno al Sole nella stessa direzione del pianeta. L'entità dello spostamento supera di 43 secondi d'arco per secolo quella teorizzata dalla meccanica newtoniana, e può essere giustificata con discreta approssimazione applicando le correzioni relativistiche, ma ciò è ancora oggetto di indagine.

I.2.2 Caratteristiche fisiche

Mercurio è un pianeta decisamente più piccolo della Terra, essendo caratterizzato da una massa pari a 0,055 masse terrestri e da un diametro pari a circa 0,38 volte quello terrestre; la sua densità media è del 2% inferiore a quella della Terra. Essa risulta comunque molto elevata, oltre 5 g/cm^3 e ciò significa che la maggior parte del pianeta è costituita da materiale pesante .

A dispetto delle piccole dimensioni, la massa di Mercurio è 4,4 volte maggiore di quella della Luna. Ciò indica che i due corpi hanno una composizione interna diversa e che la loro formazione ed evoluzione ha seguito percorsi diversi.

Sono state elaborate tre ipotesi per spiegare la composizione interna con densità così elevata: la prima prevede che Mercurio si sia formato con materiali silicei arricchiti in seguito di ferro metallico; la seconda, che la sua crosta basaltica sia stata strappata via a causa di impatti; infine la terza, ipotizza una fase di alta temperatura nella Nebula Solare che abbia volatilizzato la crosta silicea e parte del mantello.

Nella seguente tabella si riportano i parametri fisici del pianeta:

Tabella I.2 - Parametri fisici di Mercurio

Diametro equatoriale:	4879,4 km
Superficie:	$7{,}5 \times 10^{13}$ m²
Volume:	$2{,}49 \times 10^{16}$ m³
Massa:	$3{,}302 \times 10^{23}$ kg
Densità:	$5{,}427 \times 10^{3}$ kg/m³
Accelerazione di gravità (in superficie):	3,701 m/s² (0,377 g)
Velocità di fuga:	4 435 m/s
Periodo di rotazione:	58,6462 giorni (58 d 15,5088 h)
Velocità di rotazione (all'equatore):	3,0256 m/s
Inclinazione assiale:	~0,1°
Temperatura superficiale:	100 K (min) 440 K (media) 700 K (max)
Pressione atmosferica:	tracce

I.2.3 L'atmosfera

Mercurio possiede un'atmosfera estremamente rarefatta: la densità media è di soli 105 atomi/cm^3, migliore del "vuoto" che si riesce ad ottenere nei laboratori terrestri.

La temperatura del gas è di circa 500 K, cui corrisponde una pressione superficiale di $7x10^{-12}$ mbar (la pressione dell'atmosfera terrestre è in media di 1013mbar). Il libero cammino medio di una particella atmosferica (cioè la distanza media fra un urto e il successivo), è di 300000km, assai maggiore dell'altezza di scala dell'atmosfera (che per l'idrogeno è di 1000km): in questi casi ci si trova in presenza di una esosfera più che di un'atmosfera. In una esosfera gli urti fra particelle sono trascurabili, quello che domina è l'interazione particella-suolo.

Durante la missione del Mariner 10, con lo spettrometro ultravioletto, sono stati individuati idrogeno, elio e ossigeno. Molto probabilmente l'idrogeno e l'elio sono di origine solare, mentre l'ossigeno potrebbe derivare dalla scissione di molecole della crosta.

Perché almeno la metà di un'atmosfera planetaria sia stabile su un tempo scala dell'ordine del miliardo di anni è necessario che la velocità media delle particelle che la compongono sia inferiore a 1/5 della velocità di fuga del pianeta.

Per Mercurio la velocità di fuga vale 4,25km/s, 1/5 di questo valore è 0,85km/s, mentre la velocità termica media degli atomi di idrogeno, di elio e di ossigeno è, rispettivamente, di 3,5km/s, 1,7km/s e 0,9km/s. Ne deriva che Mercurio non è in grado di trattenere in modo stabile il proprio involucro di gas.

Sulla base delle osservazioni telescopiche compiute da terra nel periodo fra il 1985 e il 1986, nell'atmosfera di Mercurio sono stati rilevati anche sodio e potassio, grazie alle emissioni nel visibile di questi elementi.

Il sodio è l'elemento più abbondante; le concentrazioni sono variabili da 102 a 104 atomi/cm^3, su tempi scala che vanno da poche ore ad alcuni anni.

Ogni tanto le emissioni di tale elemento sono molto intense vicino ai poli magnetici di Mercurio e ciò indicherebbe una qualche forma di interazione fra campo magnetico e superficie.

Gli atomi di sodio e potassio sono facilmente ionizzati dalla radiazione solare. A loro volta gli ioni interagiscono con i campi elettrici della magnetosfera del pianeta e possono venire espulsi nello spazio interplanetario a causa della bassa velocità di fuga di Mercurio.

Si stima che gli atomi di sodio evaporino ad un tasso di 1,3x1022 atomi/s. Stando così le cose gli atomi di sodio devono essere continuamente rimpiazzati dalla superficie e l'atmosfera si trova in uno stato di equilibrio fra ingressi ed uscite.

Il meccanismo con cui la superficie rifornisce di sodio e potassio l'atmosfera di Mercurio non è univoco, può trattarsi di minerali scissi nei loro componenti dalla radiazione solare sia elettromagnetica che corpuscolare, oppure degli effetti di impatti di micrometeoriti.

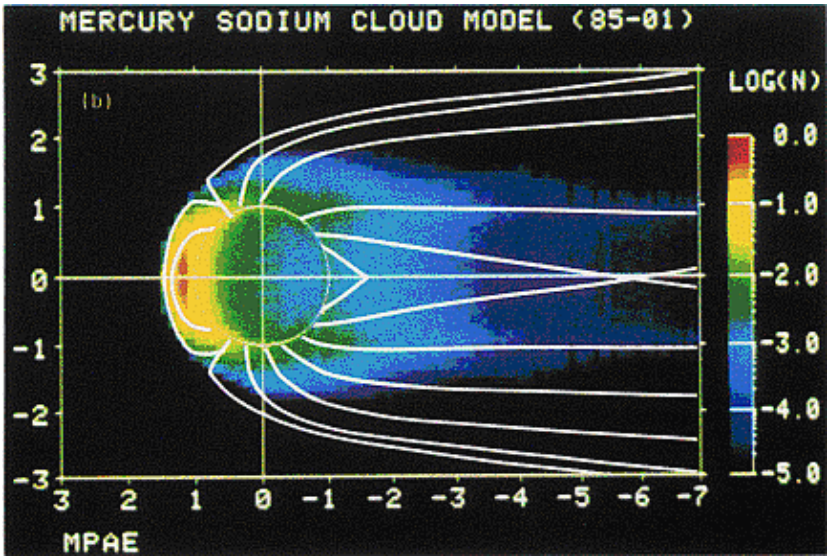


Figura I.3 - Distribuzione del Sodio nell'atmosfera di Mercurio.

La composizione dell'atmosfera è riportata nella seguente tabella:

Tabella I.3 - Composizione dell'atmosfera del pianeta Mercurio.

Gas	%
Potassio	31,7
Sodio	24,9
Ossigeno atomico	9,5
Argon	7,0
Elio	5,9
Ossigeno molecolare	5,6
Azoto	5,2
Anidride carbonica	3,6
Acqua	3,4
Idrogeno	3,2

La pressione atmosferica al suolo, misurata dalla sonda Mariner 10, è nell'ordine di un millesimo di Pascal.

A causa dell'assenza di un meccanismo di distribuzione del calore ricevuto dal Sole e a motivo della sua rotazione estremamente lenta, che espone lo stesso emisfero alla luce solare diretta per lunghi periodi, l'escursione termica su Mercurio è la più elevata finora registrata nell'intero sistema solare; l'emisfero illuminato raggiunge i 600K (700K nelle zone equatoriali), quello in ombra scende spesso fino a 90 K.

I.2.4 La superficie

Il meridiano "zero" su Mercurio coincide, per convenzione, con il punto subsolare del primo passaggio al perielio successivo al 1° gennaio 1950. Con questa scelta, e grazie alla risonanza 3/2 fra rotazione e periodo orbitale, durante i passaggi al perielio, a sole 0,308UA dal Sole, il punto subsolare cade sull'equatore del pianeta alternativamente a 0° e a 180° di longitudine. Sono questi i punti della superficie di Mercurio in cui si raggiungono le temperature più elevate, 725K (abbastanza alta da fondere lo zinco): per questo motivo sono chiamati "poli caldi".

Durante il passaggio all'afelio, a 0,466UA dal Sole, il punto subsolare cade sempre sull'equatore del pianeta ma alle longitudini 90° e 270°; qui le temperature massime raggiungono solo i 525K e questi punti sono chiamati "poli freddi".

Nell'emisfero in ombra, grazie alla mancanza di un'atmosfera consistente che ridistribuisca il calore, si possono raggiungere temperature molto basse, fino a 90K. Da questi dati si vede che l'escursione termica su Mercurio è di 635K, la più alta fra i pianeti e satelliti del Sistema Solare. Inoltre l'insolazione media della superficie mercuriana è pari a circa 6 volte e mezzo quella della Terra; la costante solare ha un valore di 14kW/m².

Per avere informazioni dettagliate sulla sua superficie si dovette attendere la prima, e per ora unica, missione spaziale verso Mercurio, quella del Mariner 10.

In base alle immagini mandate a Terra dal Mariner 10 risulta che la superficie di Mercurio presenta numerosi rilievi alcuni dei quali alti fino a diversi chilometri. Le loro caratteristiche indicano come si siano formati per compressione in seguito ad impatto di meteoriti.

Similmente alla Luna, il suolo mercuriano è ampiamente craterizzato a causa dei numerosi impatti di asteroidi che hanno contrassegnato il suo passato e presenta bacini riempiti da vecchie colate laviche, ancora evidenti a causa della mancanza quasi assoluta di un'atmosfera.

Rispetto alla Luna, i crateri secondari prodotti dai clasti scagliati in aria in seguito a un impatto meteorico, si trovano più vicini ai crateri primari, prodotti direttamente dall'impatto, a causa della maggiore intensità del campo gravitazionale. Si può dunque supporre che esistano oggigiorno terreni costituiti da crosta originaria, non ancora ricoperti dai detriti prodotti dagli urti.

Caratteristiche della superficie mercuriana sono enormi scarpate, alcune lunghe centinaia di chilometri e profonde fino a 3km, presumibilmente formatesi in seguito ad una lenta ma progressiva compressione del pianeta, la cui superficie è diminuita dello 0,1% (corrispondente a una contrazione del raggio di 1 km) da quando il pianeta si è costituito a causa del raffreddamento.

Agli scoscendimenti e ai territori craterizzati si contrappongono vaste regioni pianeggianti, forse dovute ad un'antica attività vulcanica o al rideposito di clasti sollevati in seguito agli impatti meteorici.

Negli anni Novanta da un riesame dei dati rilevati dal Mariner 10 è peraltro emersa la possibilità

che Mercurio sia stato soggetto ad attività vulcanica recente.

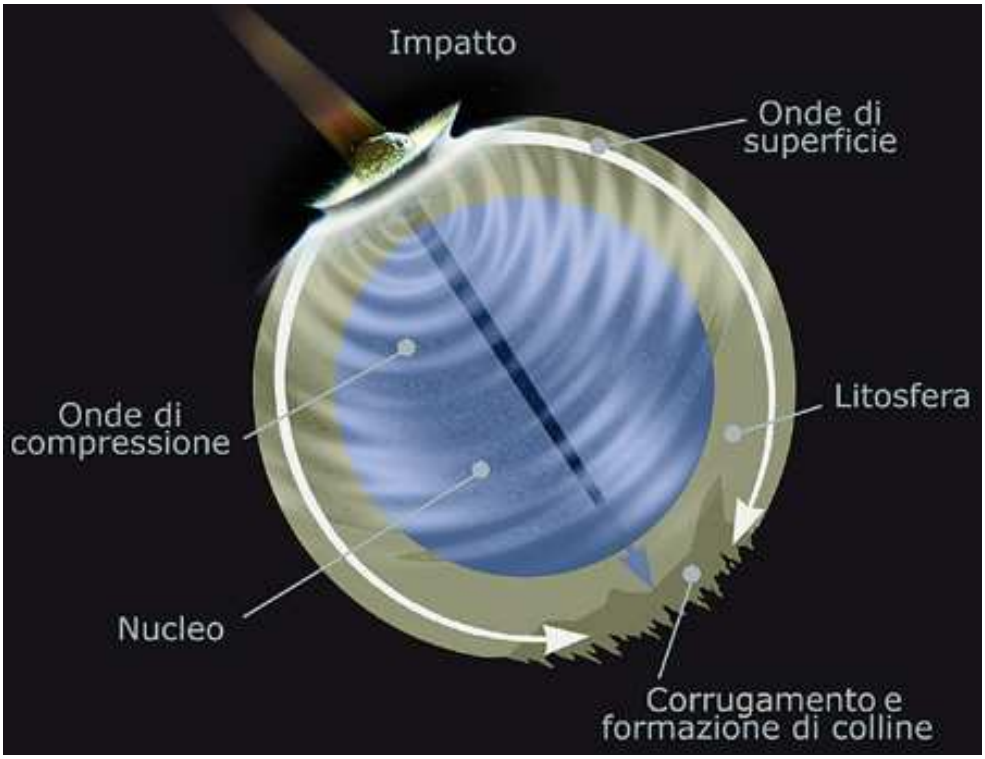


Figura I.4 - Formazione dei rilievi in seguito a impatti con meteoriti.

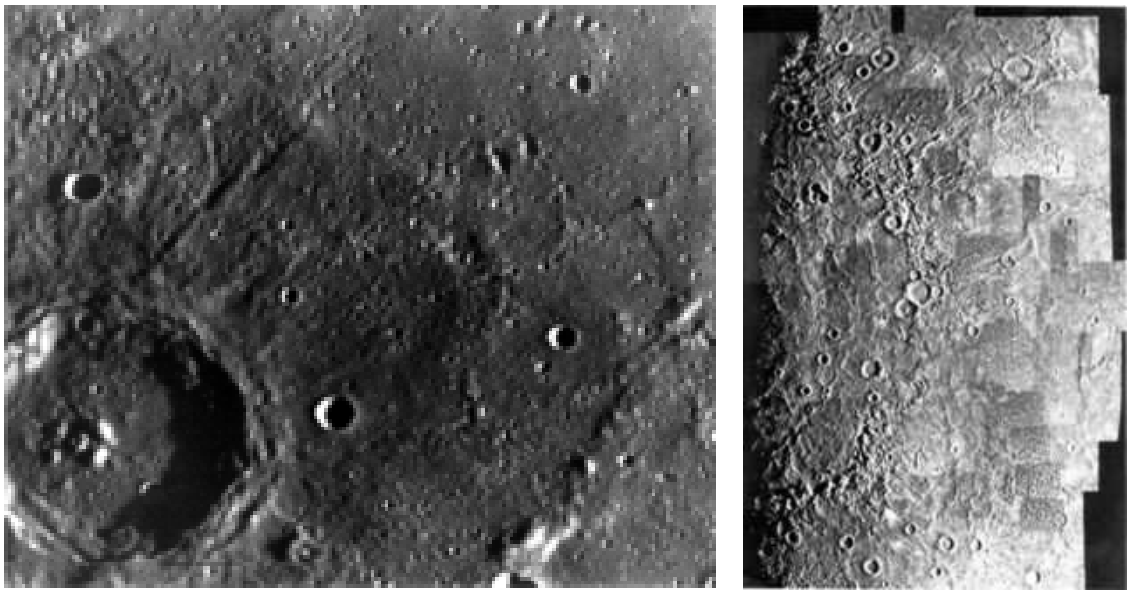


Figura I.5 - Immagini della superficie di Mercurio:il cratere Zola, a sinistra, il cui diametro è pari a 60 km. A destra si riporta un'immagine della superficie realizzata dal Mariner 10.

Probabilmente alcuni crateri alle latitudini comprese fra gli 85° e il Polo custodiscono riserve di acqua ghiacciata.

In verità, non soltanto Mercurio e la Luna hanno subito urti con meteoriti; è tuttavia normale che i pianeti in possesso di un'atmosfera consistente risentano in misura assai minore dell'effetto degli impatti, poiché i corpi incidenti vengono fortemente erosi dall'attrito atmosferico. Inoltre l'atmosfera stessa erode lentamente la superficie del pianeta, cancellando le tracce dell'urto.

I crateri più piccoli di Mercurio hanno diametro minore di 10km, quelli più grandi superano i 200km e prendono il nome di bacini.

L'albedo medio di Mercurio, pari a circa 0,1, è maggiore di quello dei mari lunari e questo può essere spiegato come dovuta alla assenza di "ilmenite", una della componenti più importanti del mari lunari.

Sorprendentemente osservazioni radar del polo nord di Mercurio (una regione non osservata dal Mariner 10) mettono in evidenza la presenza di particelle di ghiaccio nelle regioni in ombra di alcuni crateri.

Dal momento che sono necessarie temperature di -160°C per impedire una eccessiva evaporazione dell'acqua, si suppone che tali temperature si possano raggiungere all'interno di grandi crateri di impatto. L'acqua proverrebbe dagli strati più interni del pianeta oppure dal suo accumulo durante gli impatti delle comete nelle prime fasi di vita del Sistema Solare.

Sulla superficie di Mercurio l'accelerazione di gravità è mediamente pari a 0,377 volte quella terrestre.

I.2.5 La struttura interna

La densità di Mercurio, pari a 5,43kg/dm^3, si discosta molto da quella lunare e, al contrario, è molto vicina a quella terrestre. Questo lascia supporre che, nonostante le somiglianze con la Luna, la struttura interna del pianeta sia più vicina a quella della Terra, con un nucleo particolarmente massiccio (fino all'80% del raggio mercuriano) formato da elementi pesanti. I pianeti interni come Mercurio, Venere, Terra e Marte si sono formati dalla condensazione dei componenti della nube primordiale di gas e polveri che ha originato l'intero Sistema Solare, in una zona più ricca di silicati e materiale ferroso, al contrario dei pianeti esterni la cui zona di formazione era ricca di acqua, idrogeno, metano ed ammoniaca.

Nell'interno del pianeta esiste un nucleo di ferro e nichel che occupa sette parti su dieci del suo raggio (1800km).

Per spiegare l'origine del campo magnetico del pianeta si era pensato all'esistenza di una frazione liquida nel nucleo di ferro-nichel.

Il mantenimento di un nucleo liquido per miliardi di anni richiede la presenza di un elemento più leggero, come lo zolfo, che ne abbassi la temperatura di fusione dei materiali.

In proporzione, Mercurio ha il nucleo di ferro più grande di tutti i pianeti terrestri. Non è facile riuscire a capire il perché, tanto più che i modelli teorici sulla nascita del Sistema Solare prevedono densità inferiori. È possibile che il Sole, all'inizio della sua esistenza, abbia spazzato in modo più energico del previsto la parte più interna della nebulosa solare permettendo solo l'aggregazione dei metalli pesanti. Un'altra possibilità è costituita dall'impatto di Mercurio con un grosso asteroide in grado di rimuovere il mantello esterno lasciando intatto il nucleo di ferro. In questo scenario l'impatto sarebbe avvenuto dopo la differenziazione del pianeta.

I.2.6 Il campo magnetico

Una delle scoperte più interessanti del Mariner 10 è stata quella del campo magnetico di Mercurio. Il pianeta è dotato di un campo dipolare (inclinato di 11° rispetto all'asse di rotazione), con un momento magnetico di 330nT (nanotesla), 1000 volte inferiore a quello terrestre. La polarità del campo è uguale a quella della Terra, con il nord magnetico concorde con il nord geografico. L'intensità del campo magnetico di Mercurio è sufficiente per deviare le particelle cariche del vento solare e creare una magnetosfera.

Mercurio non ha l'equivalente delle fasce di Van Allen perché la magnetosfera è talmente piccola che la loro posizione viene a trovarsi al di sotto della superficie del pianeta. Il punto di equilibrio fra vento solare e campo magnetico (magnetopausa del punto subsolare) si trova a 1,35 raggi planetari dal centro del pianeta (per la Terra è a circa 10 raggi terrestri). Il campo magnetico di Mercurio non è tanto intenso da impedire che, nei periodi di forte attività del Sole, le particelle del vento solare possono raggiungere direttamente la superficie del pianeta ed interagire con essa.

Secondo la teoria comunemente accettata, un campo magnetico planetario è generato dalle correnti elettriche presenti nel nucleo metallico fuso del pianeta. La presenza del campo magnetico di Mercurio indicherebbe la presenza di un nucleo ancora fuso in grado di sostenere correnti elettriche.

In base ad una seconda teoria, i modelli della storia termica del pianeta indicherebbero che il nucleo dovrebbe essersi solidificato già da molto tempo e questo dato è in contrasto con la teoria sulla generazione del campo magnetico. Per uscire da questa contraddizione sono state proposte alcune alternative come il nucleo ancora fuso a causa di un'abbondanza anomala di elementi radioattivi come Uranio e Torio, oppure la bassa conducibilità del mantello esterno al nucleo che ne ha ostacolato il normale raffreddamento, o infine la temperatura di solidificazione del nucleo più bassa di quella del ferro per la presenza di altri elementi più leggeri come lo zolfo. Un 7% di zolfo nel nucleo permetterebbe di

avere un nucleo ancora fuso perché la temperatura di solidificazione si abbassa a soli 1300K, dipendendo molto debolmente dalla pressione.

Quello del campo magnetico di Mercurio resta uno dei grandi problemi che la planetologia deve ancora risolvere.

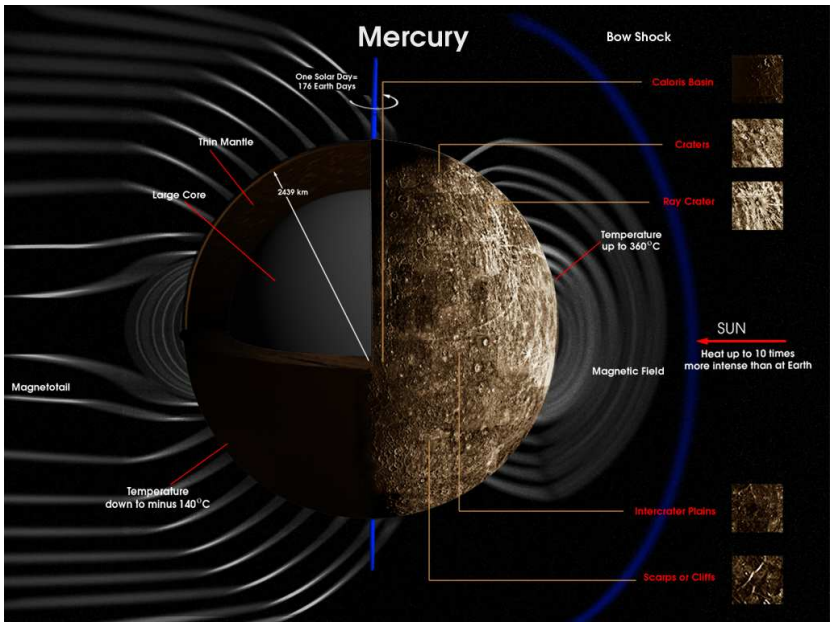


Figura I.6 - Schematizzazione grafica delle attuali conoscenze su Mercurio.

Capitolo II

LA MISSIONE BEPICOLOMBO E SIMBIO-SYS

La missione BepiColombo rappresenta le fondamenta del programma di esplorazione di Mercurio dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) in collaborazione con la Agenzia Spaziale Giapponese (JAXA). Attualmente la missione è basata su due componenti principali, il Mercury Planetary Orbiter (MPO), che trasporterà gli strumenti destinati allo studio della superficie e della composizione interna del pianeta, e il Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), che trasporterà gli strumenti dedicati allo studio della magnetosfera del pianeta.

La sonda è stata dedicata al professore Giuseppe Colombo, detto Bepi, eminente matematico e fisico italiano del XX secolo che ha insegnato all'Università degli Studi di Padova.

Soprannominato "Meccanico del cielo", contribuì all'impresa del Mariner-10 del 1974, proponendo per la prima volta l'uso di una fionda gravitazionale con Venere per far incontrare la sonda con Mercurio ben tre volte; egli scoprì infatti l'accoppiamento tra rivoluzione e rotazione di Mercurio (il pianeta compie tre rotazioni intorno al proprio asse ogni due rivoluzioni intorno al Sole).

Il professor Colombo viene ricordato inoltre per la pianificazione di flyby multipli con Mercurio nel 1972-73.

II.1 DETTAGLI DELLA MISSIONE

I due elementi caratterizzanti la Missione BepiColombo dovrebbero essere lanciati da un Ariane 5 contemporaneamente o da un lanciatore Sojuz nel 2013.

La sonda raggiungerà Mercurio nel 2019 dopo un viaggio di sei anni verso la parte più interna del sistema solare.

La missione BepiColombo, frutto di una collaborazione tra Europa (ESA) e Giappone (JAXA) consta di due satelliti: MPO (Mercury Planetary Orbiter), responsabile ESA, una sonda stabilizzata su tre assi dedicata al 'remote sensing', posta in un'orbita lievemente eccentrica (pericentro ed apocentro rispettivamente a 400km e 1500km di quota); MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter), responsabile

JAXA, un satellite stabilizzato per rotazione posto in un'orbita particolarmente eccentrica (pericentro ed apocentro rispettivamente a 400km e 12000km di quota), dedicato a misure magnetosferiche.

Si tratta della prima missione doppia verso Mercurio, che prevede la fornitura di una sonda europea ed una giapponese. Sotto la leadership dell'ESA, il programma verrà portato avanti come missione congiunta.

Le sonde dovrebbero effettuare un viaggio verso Mercurio utilizzando una propulsione solare elettrica e la spinta gravitazione della Luna, di Venere e di Mercurio. L'ingresso in orbita attorno a Mercurio è previsto per l'agosto del 2019.

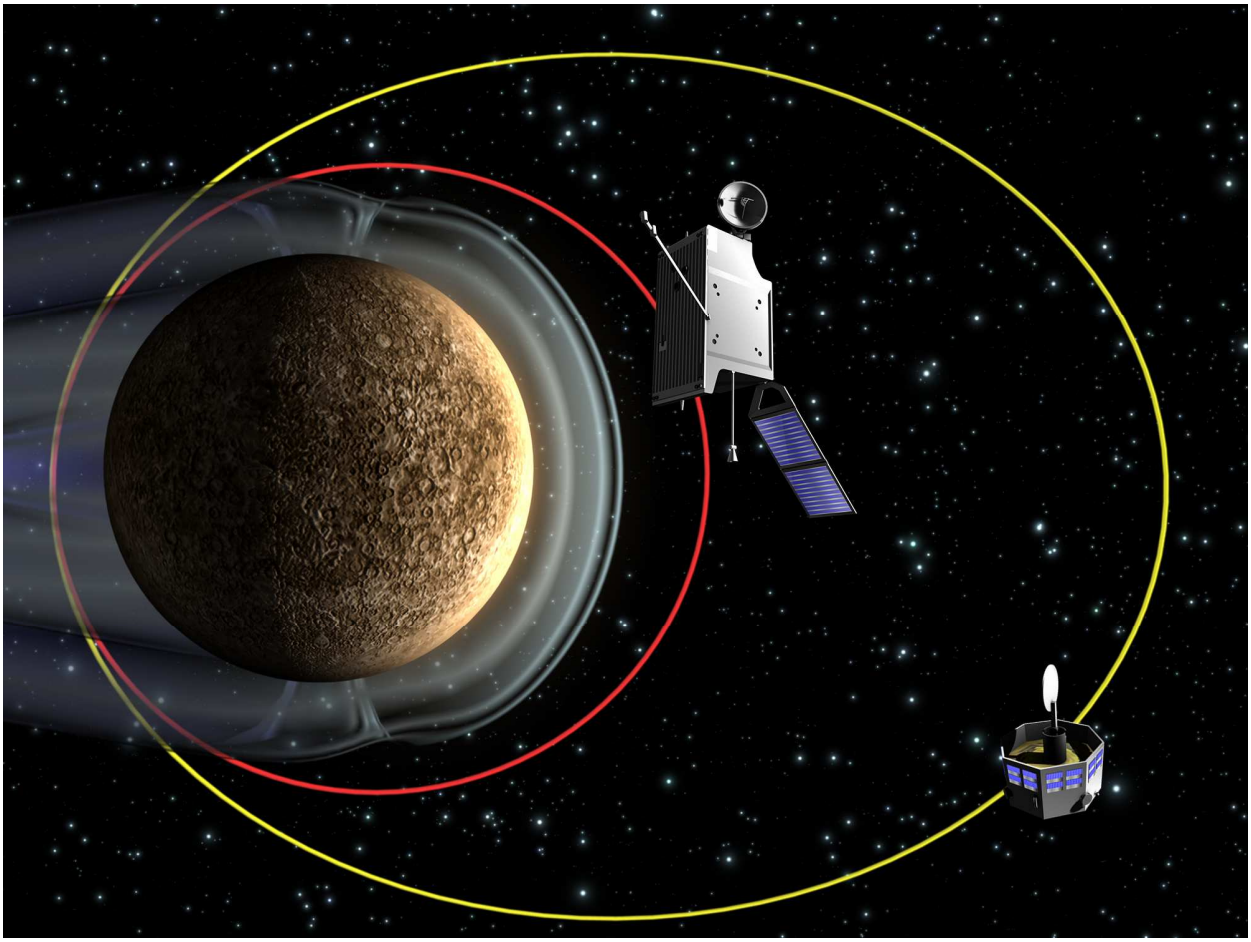


Figura II.1 – Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si possono vedere i due componenti principali: MPO (Mercury Planetary Orbiter) e MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter).

Le due sonde cercheranno di trovare risposta a quesiti scientifici quali l'origine e l'evoluzione di un pianeta vicino alla sua stella madre, lo stato dell'interno di Mercurio e del suo campo magnetico. Inoltre, durante la missione verrà svolto un test sulla teoria della relatività generale di Einstein.

Una delle sonde, il Mercury Planetary Orbiter (MPO) dell'ESA, trasporterà undici strumenti destinati allo studio della superficie e della composizione interna del pianeta. Questo studio si affiderà a diverse lunghezze d'onda e tecniche di indagine per ottenere risultati di un'accuratezza senza precedenti.

La seconda sonda, il Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) della JAXA, trasporterà cinque strumenti dedicati allo studio della magnetosfera del pianeta, la regione dello spazio intorno a Mercurio dominata dal suo campo magnetico. Astrium guiderà per conto dell'ESA una la progettazione e la realizzazione della sonda MPO dell'ESA e il cosiddetto Mercury Transfer Module, il modulo che porterà a destinazione le due sonde MPO-MMO.

I principali problemi tecnici derivano dal tipo di ambiente caratterizzante Mercurio, definito ostile a causa della sua vicinanza al Sole. Le radiazioni nei suoi pressi sono circa dieci volte più intense rispetto a quelle registrate in prossimità della Terra e questo rende molto più complessa la guida e la gestione di una sonda.

Una difficoltà ulteriore è rappresentata dal fatto che l'arrivo su Mercurio e il successivo ingresso nella sua orbita richiedono una grande quantità di energia per contrastare l'attrazione gravitazionale del Sole. A questo scopo, come detto sopra, per le fasi di viaggio e di inserimento nell'orbita ci si affiderà principalmente alla propulsione elettrico-solare, complementando con diverse manovre a gravità assistita e propulsione convenzionale (chimica).

Per ottenere i migliori risultati scientifici, l'assetto di volo di Mercurio Planetary Orbiter sarà orientato in modo da puntare gli strumenti verso il pianeta. Si tratta di un'operazione mai tentata prima d'ora nei pressi di Mercurio a causa dell'intenso calore proveniente dalla sua superficie.

II.2 OBIETTIVI DELLA MISSIONE

Grazie alla missione BepiColombo potranno essere studiati e capiti la composizione, la geofisica, l'atmosfera, la magnetosfera e la storia di Mercurio, il pianeta meno-esplorato nel sistema solare interno.

I principali obiettivi scientifici della missione sono:

- origine ed evoluzione dei pianeti vicini al Sole;
- configurazione di Mercurio, struttura interna e composizione;
- dinamica interna e origine del suo campo magnetico;
- modifiche exogeniche e endogeniche della superficie (craterizzazioni, tettonica e vulcanismo);
- composizione, origine e dinamica dell'esosfera di Mercurio e depositi polari;
- struttura e dinamica della magnetosfera;
- test della teoria della Relatività Generale di Einstein.

Questi obbiettivi, più approfonditamente si traducono nel:

- capire perché la densità di Mercurio è marcatamente superiore a quella di tutti gli altri pianeti terrestri, luna inclusa;
- capire se il centro di Mercurio è liquido o solido e se il pianeta presenta ancora oggi attività tettonica;
- capire perché un pianeta così piccolo possieda un campo magnetico intrinseco, mentre Venere, Marte e la Luna non ne hanno traccia; studiare se l'ambiente magnetizzato di Mercurio è caratterizzato dalle reminescenze di aurore, delle cinghie di radiazione e dei substorms magnetosferici osservati a terra;
- capire perché le osservazioni spettroscopiche non rivelano la presenza di ferro, mentre questo elemento è presunto come il costituente principale del pianeta;
- studiare se i crateri permanentemente ombreggiati delle regioni polari contengono sulfuro o ghiaccio d'acqua;
- osservare l'emisfero di Mercurio non visibile da Terra;
- studiare i meccanismi di produzione del esosfera e capire l'interazione fra il campo magnetico planetario ed il vento solare in assenza di ionosfera;
- ottenere nuovi indizi circa la composizione della nebulosa solare primordiale e circa la formazione del sistema solare;
- verificare la relatività generale con una migliore accuratezza, approfittando della prossimità del Sole e considerando che l'avanzamento del perielio di Mercurio è stato spiegato in termini di curvatura relativistica dello spazio-tempo.

Mercurio, che è parte della famiglia dei pianeti terrestri, costituisce elemento essenziale per tracciare l'origine e l'evoluzione dell'intero gruppo. Infatti, essendo il pianeta più vicino al Sole, il suo studio è fondamentale per definire e verificare i modelli di formazione del Sistema Solare. Inoltre, la conoscenza dell'origine e dell'evoluzione dei pianeti terrestri gioca un ruolo fondamentale per comprendere le condizioni in cui si è formata la vita sulla Terra, e quelle in cui si potrebbe formare in altri sistemi planetari.

Fino ad ora l'unica missione che abbia osservato da vicino Mercurio è la sonda americana Mariner-10 che ha compiuto 3 passaggi nei pressi di Mercurio nel 1974-1975 ottenendo immagini a bassa risoluzione di quasi metà della superficie e scoprendo, tra l'altro, che il pianeta inaspettatamente possiede un proprio campo magnetico.

A distanza di quasi 30 anni i risultati della sonda Mariner 10 sono stati più volte analizzati; il quadro scientifico che ne è scaturito è comunque ancora molto approssimativo, data la scarsità dei dati

raccolti e la scarsa accuratezza della gran parte delle misure. Pertanto le questioni più importanti su Mercurio rimangono ancora senza una chiara risposta.

Dopo Mariner-10 e prima di BepiColombo, Mercurio sarà osservato dalla missione NASA Messenger che tuttavia ha strumenti di bordo non in grado di fornire le prestazioni ed i risultati che BepiColombo è in grado di produrre.

La missione ESA/JAXA BepiColombo ha un carattere fortemente interdisciplinare in quanto fornirà dati di valore fondamentale almeno per 3 diverse comunità scientifiche: quella planetologica, quella che studia la fisica fondamentale e quella dedicata a studi dell'interazione tra Sole e pianeti, e quindi sarà in grado sia di analizzare le caratteristiche geomorfologiche e dinamiche sia di caratterizzare l'esosfera di Mercurio e le sue interazioni con la superficie, con il mezzo interplanetario (vento solare e raggi cosmici).

II.3 I COMPONENTI DELLA MISSIONE

Come detto sopra la Missione BepiColombo sarà caratterizzata dalla realizzazione di due elementi principali, che di seguito sono rappresentati nel dettaglio.

II.3.1 MPO (Mercury Planetary Orbiter)

Il primo dei due elementi trasporterà un insieme altamente sofisticato di undici strumenti scientifici, dieci dei quali saranno forniti dai principali ricercatori con finanziamenti nazionali degli stati membri dell'ESA ed uno dalla Russia.

In breve gli undici strumenti sono:

- Altimetro del laser di BepiColombo (BELA) caratterizzerà la morfologia della superficie e di topografia di Mercurio. Inoltre fornirà un modello digitale del terreno che, rispetto ai dati dal PIÙ strumento, concederà ottenere le informazioni sulla struttura interna, sulla geologia, sulla tettonica e sull'età della superficie del pianeta.
- Accelerometro italiano della molla (AIZ) Gli obiettivi dell'accelerometro di AIZ sono collegati forte con quelli del PIÙ esperimento. Gli esperimenti possono fornire insieme le informazioni sulla struttura interna di Mercurio così come la teoria del Einstein della prova della relatività generale.

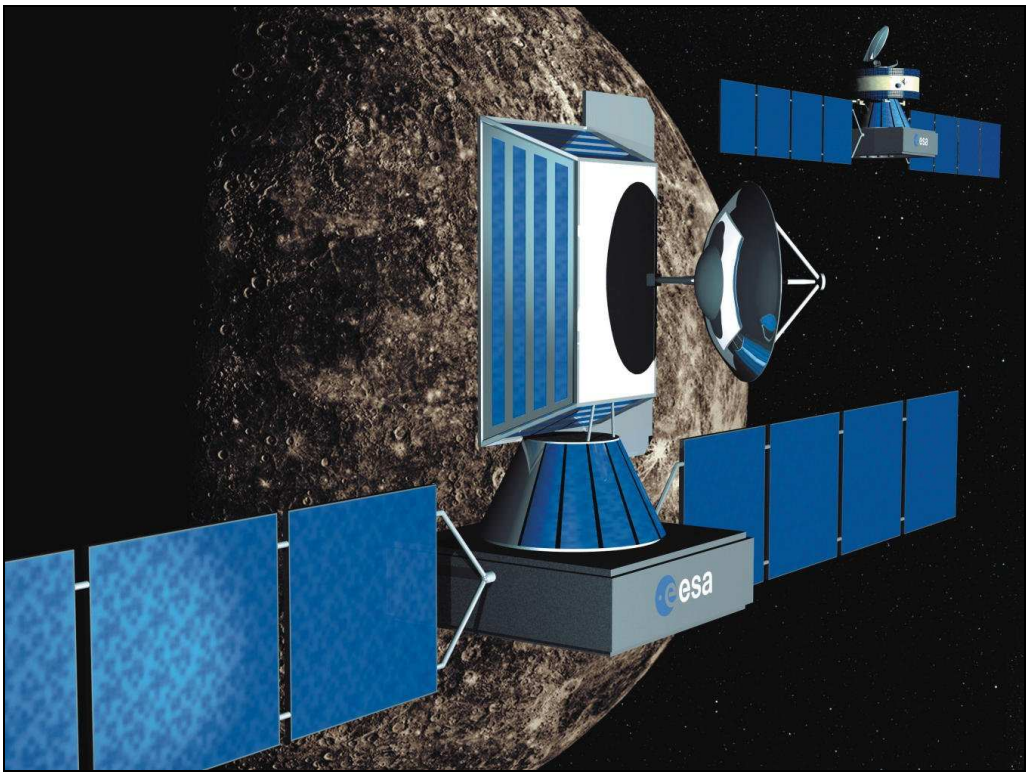


Figura II.2 – Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si può il modulo MPO (Mercury Planetary Orbiter).

- Magnetometro di Mercurio (MERMAG) fornirà le misure che condurranno alla descrizione dettagliata del campo magnetico planetario e della relativa fonte di Mercurio, per capire più meglio l'origine, lo sviluppo e lo stato attuale dell'interiore planetario, così come l'interazione fra la magnetosfera di Mercurio con il pianeta in se e con il vento solare.
- Spettrometro infrarosso termico di Mercurio (MERTIS) fornirà alle informazioni dettagliate circa la composizione mineralogica dello strato di superficie di Mercurio un'alta risoluzione spettrale, cruciale per la selezione il modello valido per l'origine e dello sviluppo del pianeta.
- Raggio gamma di Mercurio e spettrometro di neutrone (MGNS) determinerà le composizioni elementari della superficie e della sottosuperficie di Mercurio e determinerà la distribuzione regionale dei depositi volatili sulle zone polari che permanentemente saranno ombreggiate a partire dal Sole.
- Spettrometro di raggi X di formazione immagine di Mercurio (MIXS) userà il metodo di analisi delle fluorescenze dei raggi X del `per produrre un programma globale della composizione atomica di superficie ad alta risoluzione spaziale. Questa tecnica inoltre è stata usata dallo strumento di D-CIXS sulla missione di SMART-1 del SEC alla Luna.
- Esperimento di scienza della radio dell'orbita di Mercurio (PIÙ) contribuiranno a determinare il campo di gravità di Mercurio così come il formato e la condizione fisica del relativo centro.

Fornirà i vincoli sperimentali cruciali ai modelli delle teorie della struttura interna e della prova del pianeta di gravità esattezza senza precedenti.

- Di sondaggio di Hermean Exosphere dalla spettroscopia ultravioletta (PHEBUS) Lo spettrometro di PHEBUS è votato alla descrizione della composizione e della dinamica dell'esosfera di Mercurio. Inoltre cercherà gli strati di superficie del ghiaccio nelle regioni permanentemente ombreggiate di crateri di alto-latitudine.
- Ricerca del riempimento di Exosphere e dell'abbondanza neutra emessa (SERENA) studierà l'interazione gassosa fra superficie, esosfera, la magnetosfera ed il vento solare.
- Spettrometri e toner per il sistema dell'osservatorio integrato BepiColombo di MPO (SYMBIO-SYS) esaminerà (anche nella stereotipia e colore) la geologia di superficie, il vulcanismo, la tettonica globale, l'età e la composizione di superficie e la geofisica.
- Spettrometro di raggi X solare di intensità (SIXS) effettuerà le misure dei raggi X e le particelle dell'origine solare a risoluzione di ora e ad un campo visivo molto largo.

Il modulo MPO è un satellite stabilizzato a 3 assi "nadir-pointing".

Esso ha un tempo di vita previsto di un anno terrestre con la possibilità di estenderlo di un ulteriore anno.

Uno degli assi è allineato con la direzione di nadir per poter permettere un'osservazione continua del pianeta da parte della strumentazione e dei vari sensori e spettrometri. In questo modo il puntamento continuo consente di ottenere immagini ad alta qualità.

Il lato orientato continuamente verso il Sole è schermato in modo da mantenere la temperatura dello spacecraft entro livelli moderati e proteggere la struttura dall'intensa radiazione solare.

Il modulo ha un peso di circa mezza tonnellata, di cui 60kg sono di payload. Esso ha un'antenna di 1 m, ad alto guadagno, direzionabile e a bande X/Ka.

Si prevede una trasmissione di circa 1550Gb di dati nel corso dell'anno di missione. La stazione di telemetria sarà l'antenna da 35m di Cebreros, in Spagna.

L'energia è prodotta mediante pannelli solari, data la grande vicinanza al Sole.

II.3.2 MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter)

Orbita magnetosferica di Mercurio (JAXA) MMO trasporterà cinque ha avanzato gli esperimenti scientifici che inoltre saranno forniti dai ricercatori principali nazionalmente costituiti un fondo per, uno europeo e quattro dal Giappone. I contributi europei significativi inoltre sono forniti agli strumenti giapponesi:

- Magnetometro di Mercurio (MERMAG) fornirà una descrizione dettagliata della magnetosfera di Mercurio e della relativa interazione il campo magnetico planetario ed il vento solare.
- Esperimento della particella del plasma di Mercurio (MPPE) studierà le particelle low- e alto-energiche nella magnetosfera.
- Strumento dell'onda di plasma di Mercurio (PWI) farà un'analisi dettagliata della struttura e della dinamica della magnetosfera.
- Toner spettrale atmosferico del sodio di Mercurio (MSASI) misurerà l'abbondanza, la distribuzione e la dinamica di sodio nel exosphere di Mercurio.
- Monitor della polvere di Mercurio (MDM) studierà la distribuzione di polvere interplanetaria nell'orbita di Mercurio.

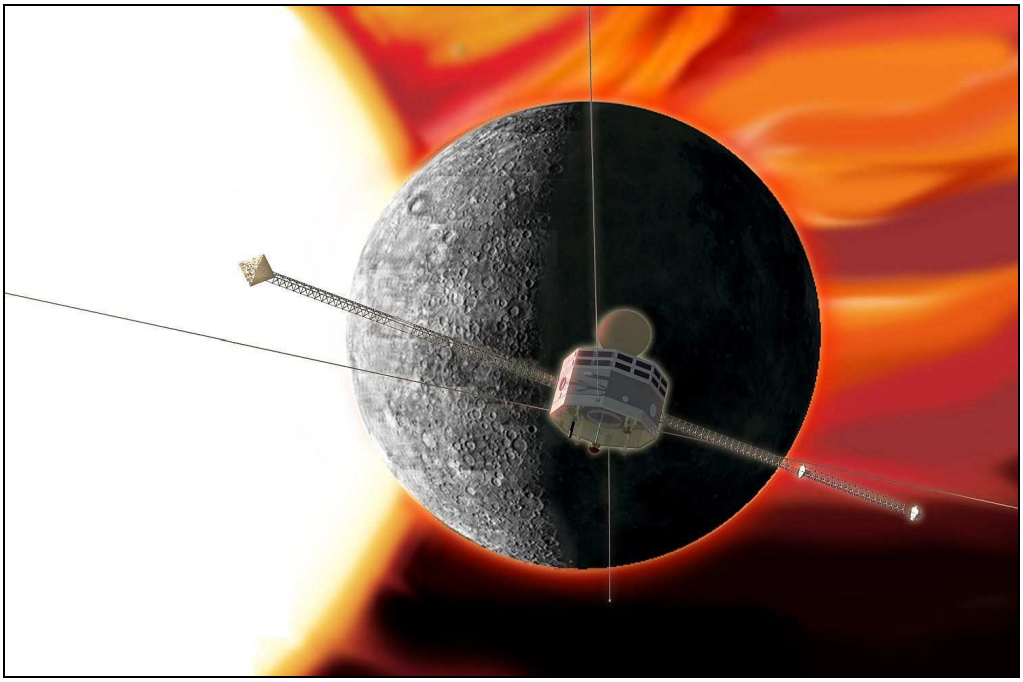


Figura II.3 – Rappresentazione della missione BepiColombo in cui si può il modulo MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter).

MMO è un satellite spinnante, con periodo di spin di 4 secondi.

L'asse di spin è perpendicolare al piano equatoriale di Mercurio al fine di eliminare la luce solare riflessa dalle parti superiori e inferiori dello spacecraft e garantire il continuo puntamento della high antenna verso la Terra con il minimo sforzo.

L'asse maggiore si trova nel piano equatoriale per poter così permettere l'esplorazione globale della magnetosfera ad una distanza di circa sei raggi planetari dal centro di Mercurio.

Dal lato dei pannelli è montata una specie di specchio per riflettere l'intensa luce solare. Tale dispositivo riflette la luce nel campo visibile ed emette nel campo infrarosso in modo che la temperatura all'interno dello spacecraft rimanga prossima alla temperatura ambiente.

II.4 SIMBIO-SYS

SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory SYStem) è un pacchetto integrato nel modulo MPO.

La progettazione del payload è stata affidata interamente a centri di ricerca italiani sotto la supervisione dell'ASI.

Gli obiettivi principali di SIMBIO-SYS sono:

- creare una mappatura della superficie di Mercurio con immagini stereoscopiche aventi una risoluzione spaziale da 50m a 110m e una precisione verticale di 84m al periermio lungo l'equatore, con l'obiettivo di definire le unità geologiche primarie, le strutture tettoniche a larga scala, la distribuzione della popolazione dei crateri e dei vulcani (se presenti). Le immagini stereo permetteranno la definizione della topografia con un alto livello di dettaglio.
- Elaborare una mappatura a colori di regioni selezionate (almeno il 10% della superficie del pianeta) attraverso sei filtri colorati in un range spettrale di 410-930nm; si vuole compiere un'identificazione di strutture stratificate, una caratterizzazione su scala locale dei crateri ed edifici vulcanici (se presenti), determinare i rapporti genetico-evolutivi tra le strutture a piccola scala e le strutture geologiche a scala regionale.
- Compiere una mappatura mineralogica globale della superficie e correlare la composizione superficiale con le strutture morfologiche superficiali, determinando la quantità dei principali composti mineralogici ed identificando le varie specie mineralogiche con un livello di confidenza del 5-10%.
- Creare una mappatura globale mediante spettroscopia nel range spettrale 400 – 2100nm con una risoluzione spaziale migliore di 500m.
- Compiere imaging ad elevata risoluzione spaziale (5-10m) di aree selezionate raggruppando il 20% della superficie del pianeta con un filtro pacromatico e tre differenti filtri a larga banda-passante.
- Fornire immagini iperspettrali di aree selezionate nel range 400–2100nm con un campionamento al di sotto di 100m.
- Creare curve spettrofotometriche per lo studio del regolite superficiale.

Gli strumenti ottici presenti nel modulo sono:

- High-Resolution Imaging Camera (HRIC)
- Stereo Camera (STC)
- Visual and Infrared Hyper-spectral Imager (VIHI)

Lo strumento comprende quindi un canale per la spettroscopia *(VIHI*: Visual and Infrared Hyper-spectral Imager); un canale per il mapping superficiale stereo a media risoluzione (*STC*: Stereo Imaging Channel) nominato sopra; un canale per imaging ad alta risoluzione spaziale (*HRIC*: High Resolution Imaging Channel).

SIMBIO-SYS è dedicato all'investigazione spettroscopica, all'imaging ad alta risoluzione e alla ricostruzione tridimensionale della superficie di Mercurio. Tale strumento è un sistema a singolo IFE (Instrument Front End) che include tre diversi "canali". La filosofia adottata nella progettazione è quella di integrare, il più possibile, obiettivi scientifici e caratteristiche tecniche per massimizzare il ritorno scientifico e, allo stesso tempo, minimizzare la richiesta di risorse.

La sua prima rappresentazione risalente al suo primo design si può vedere in Fig.III.1 dove sono messi in evidenza i suoi componenti: STC (Stereo Channel), HRIC (High spatial Resolution Imaging Channel) e VIHI (Visible Infrared Hyperspectral Imager Channel).

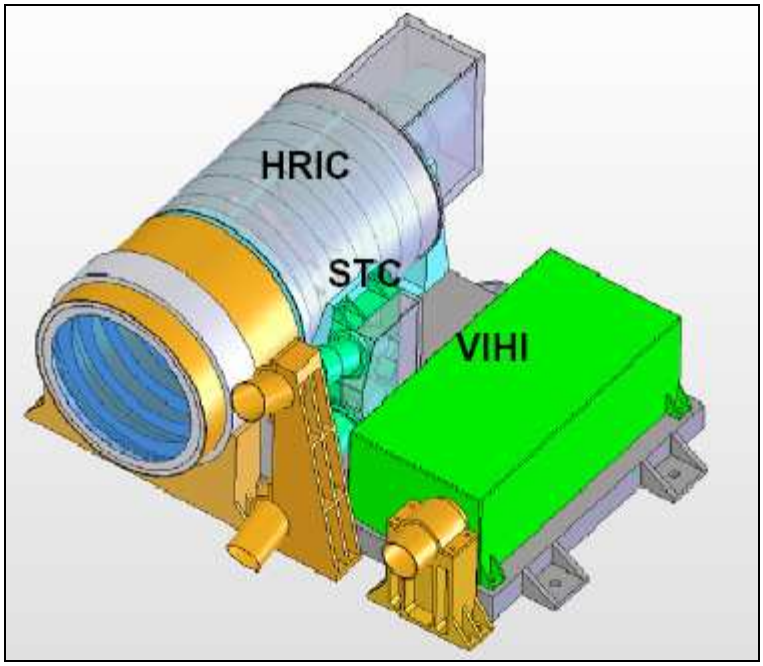


Figura II.4 – SIMBIO-SYS (Spectrometer and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System).

In Fig.III.2 è possibile vedere l'ultima configurazione della suite di strumenti attualmente oggetto di studio ed è possibile notare il particolare STC-VIHI, questi due strumenti dovrebbero essere vincolati alla stessa struttura in Invar. In Fig.III.3 sono evidenziati i particolari dell'ultima versione della stereocamera.

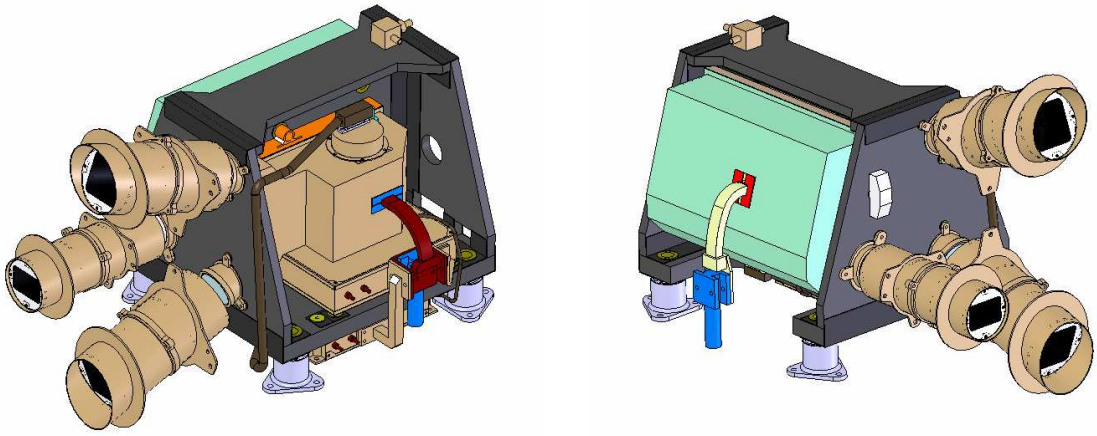


Figura II.5 – SIMBIO-SYS (Spectrometer and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System).

II.5 HIGH-RESOLUTION IMAGING CAMERA (HRIC)

HRIC (High Resolution Imaging Channel) fornirà una risoluzione massima di 5 m; esso utilizza un filtro pancromatico e 3 filtri a banda larga.

HRIC e' inoltre uno strumento fondamentale per l'esperimento di librazione.

Compito principale di questo strumento è quello di individuare speciali target sulla superficie del pianeta.

Il rapporto segnale-rumore è >100 in tutte le condizioni operative nominali.

II.6 LA STEREO CAMERA (STC)

STC (STereo imaging Channel) è una stereo camera che fornisce una risoluzione massima di 50m e che utilizza 2 filtri pancromatici per lo stereo e quattro filtri a banda larga, per le immagini a colori.

STC fornirà una determinazione della topografia del pianeta con una risoluzione verticale massima dell'ordine di 80m.

II.7 VISUAL AND INFRARED HYPER-SPECTRAL IMAGER (VIHI)

VIHI è un imager iperspettrale nel campo del visibile e del vicino infrarosso.

L'obiettivo principale è fornire la mappatura mineralogica di tutta la superficie di Mercurio con una risoluzione spaziale massima di 100m, nel range spettrale 400-2000nm ed un campionamento di 6,25nm.

Esso copre un range spettrale compreso tra 400nm e 2000nm estendibile fino a 2200nm.

L' IFOV di 250µrad e una risoluzione spaziale di 100m al periermio, permettono di correlare la composizione mineralogica con le caratteristiche morfologiche della superficie. Lo strumento permette di realizzare una mappatura mineralogica globale con una risoluzione inferiore ai 400m, di identificare le specie mineralogiche con un livello di confidenza del 5-10% e di correlare la composizione e le caratteristiche morfologiche ad una scala di 400m, per l'osservazione globale, e di 100m per delle porzioni selezionate della superficie (> 5% della superficie coperta globalmente).

Il FoV è di 1,47°.

Combinando i dati dai canali di SIMBIO-SYS si possono correlare la composizione dell'esosfera, il profilo di densità e la mineralogia della superficie.

Per ottimizzare le risorse i tre strumenti ottici saranno gestiti da una elettronica digitale comune che si occuperà anche dell'interfaccia con il satellite. Nella definizione delle modalità operative della strumentazione si è cercato di privilegiare la massima flessibilità; ciò permetterà l'uso simultaneo di uno o più sensori per massimizzare il ritorno scientifico da zone ritenute molto interessanti, oppure di ridurre il "data rate" ove necessario.

II.8 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

I tre canali HRIC, STC e VIHI sono altamente integrati in modo tale che gli obiettivi scientifici di imaging e spettroscopia dal visibile al vicino infrarosso siano sempre garantiti.

Da un punto di vista termico si prevede l'implementazione di dispositivi dedicati, quali baffles riflettenti e filtri per la reiezione dell'infrarosso, per il controllo termico passivo dei flussi termici provenienti dall'ambiente di Mercurio. Tale interfaccia è definita e opportunamente gestita con il satellite, per minimizzare il carico termico su di esso e per massimizzare le prestazioni ottiche dei tre canali.

Dal punto di vista dei componenti, alcuni importanti aspetti innovativi riguardano i rivelatori delle due camere ed il sensore IR dello spettrometro ad immagine.

Entrambi i canali per imaging (stereo e alta risoluzione) utilizzano un sensore ibrido 2048x2048 con dimensione del pixel di 10μm. Tali rivelatori offrono un minor consumo ed una maggiore tolleranza alle radiazioni rispetto ai tradizionali CCD. Necessitano tuttavia di un Thermal Electric Cooler per garantire temperature nominali prossime a 0°C durante le calibrazione e prossime a non più di 20°C durante le osservazione.

Un altro aspetto tecnologico rilevante è la realizzazione di sistemi di baffles e filtri per la riflessione del flusso termico ambientale (planetario e solare) al di fuori della banda di funzionamento di ciascun canale ottico: la costante solare di mercurio raggiunge infatti 14400W/^{m2}.

II.9 SINERGIE TRA GLI STRUMENTI ITALIANI

SIMBIO-SYS ha una rilevante collaborazione tecnico-scientifica e sinergia con lo spettrometro UV-PHEBUS, perché insieme i due strumenti forniranno la mappatura spettroscopica della superficie dall'UV al vicino infrarosso, consentiranno di comprendere quali minerali principalmente contribuiscono al rilascio di volatili nell'esosfera e di identificare le regioni caratterizzate da un maggior contributo all'esosfera. Altrettanto rilevante, dal punto di vista dell'interazione sinergica con altri strumenti, è quella con ISA poiché il canale ad alta risoluzione (HRIC) avrà il compito di consentire una identificazione ad altissima precisione della posizione di "features" superficiali del pianeta. Questa informazione risulterà essenziale per il raggiungimento di alcuni dei principali obiettivi scientifici di ISA.

SERENA è uno strumento di particelle che insieme a PHEBUS coprirà uno dei principali obiettivi della missione, cioè la caratterizzazione dell'esosfera e delle sue interazioni con l'ambiente circostante. Particolarmente importante è, quindi, la sinergia tra questi due strumenti fortemente complementari. Infatti, mentre PHEBUS caratterizzerà la composizione ed il profilo in altezza dell'esosfera, SERENA investigherà principalmente, tramite osservazioni di particelle, le interazioni ed i processi che avvengono nell'esosfera ed in generale nell'ambiente di Mercurio. Particolarmente interessante potrà essere anche il confronto tra osservazioni dell'unità SERENA/ELENA che misura particelle neutre direzionali rilasciate dalla superficie ad alta risoluzione spaziale, con le caratteristiche morfologiche osservate da SIMBIO-SYS e con le osservazioni di composizione superficiale ricavate da MIXS. Inoltre sarà interessante confrontare le regioni di emissione di particelle dalla superficie causata dall'impatto del vento solare (osservate da SERENA) con le regioni di emissione X indotta dalla precipitazione di raggi cosmici solari (monitorate da SIXS e MIXS).

ISA è un accelerometro che ha il ruolo chiave di misurare le accelerazioni non-gravitazionali nel forte ambiente radiativo che caratterizza Mercurio. Tali misure sono fondamentali per una ricostruzione accurata dell'orbita del satellite MPO attorno a Mercurio e per il successo del Radio Science Experiment (RSE) di MORE. MORE, di leadership italiana, coordinerà un esperimento di gravimetria, un esperimento di rotazione ed un esperimento di Relatività Generale. Quindi ISA risulta in stretto legame sinergico con i restanti strumenti che caratterizzano il RSE, quali il transponder in banda Ka (di costruzione italiana), il sensore stellare e la camera ad alta risoluzione. Per quanto riguarda i restanti strumenti italiani ISA, tramite l'esperimento di rotazione di MORE, risulterà in sinergia con SIMBIO-SYS.

Capitolo III

LA STEREOCAMERA DI SIMBIOSYS

III.1 STC: STEREO IMAGING CHANNEL

La stereocamera (detta STC) che dovrebbe essere utilizzata nella missione BepiColombo si troverà a bordo del Mercury Planetary Orbiter e rientra nella suite di camere SIMBIO-SYS che verrà predisposta per le osservazioni della geomorfologia e della composizione della superficie di Mercurio. Infatti questa suite di strumenti è costituita di diversi canali per il mapping dell'intera superficie del pianeta a media risoluzione spaziale, per l'osservazione di selezionate aree superficiali ad alta risoluzione spaziale e per il mapping spettroscopico ad alta risoluzione spettrale dell'intero pianeta.

Una delle principali difficoltà nel campo della realizzazione di immagini relative a corpi tridimensionali è la capacità di ricreare anche la terza dimensione, mettendo in risalto la profondità degli elementi che si vanno ad osservare.

Grazie alla particolare e innovativa configurazione ottica, la stereo camera del sistema di imaging SIMBIOSYS consentirà una ricostruzione stereoscopica della superficie di Mercurio, mettendone in risalto la conformazione.

La Stereo Camera del sistema SIMBIOSYS è uno strumento innovativo da un punto di vista ottico. Il progetto è stato studiato presso il LUXOR (Laboratory for ultraviolet and X-ray Optical Research) che, in collaborazione con il l'INAF di Padova e il DEI (Dipartimento di Ingegneria Elettronica e Informatica), si sta occupando della parte ottica e dell'analisi delle problematiche legate alla ricostruzione stereoscopica della superficie di Mercurio.

Il requisito scientifico principale di STC è la capacità di fornire immagini della superficie del pianeta con una scala media di 110m/px, e una scala massima di 50m/px al periermio dell'orbita, a 400km di altezza dalla superficie sull'equatore.

La configurazione ottica della camera è stata studiata per soddisfare gli obiettivi derivanti dalla necessità di avere immagini tridimensionali e a colori della superficie dell'intero pianeta per studiarne la composizione.

Lo strumento sfrutta un nuovo concetto di push-frame imaging per l'acquisizione delle immagini che serviranno per ricostruire la forma tridimensionale della superficie.

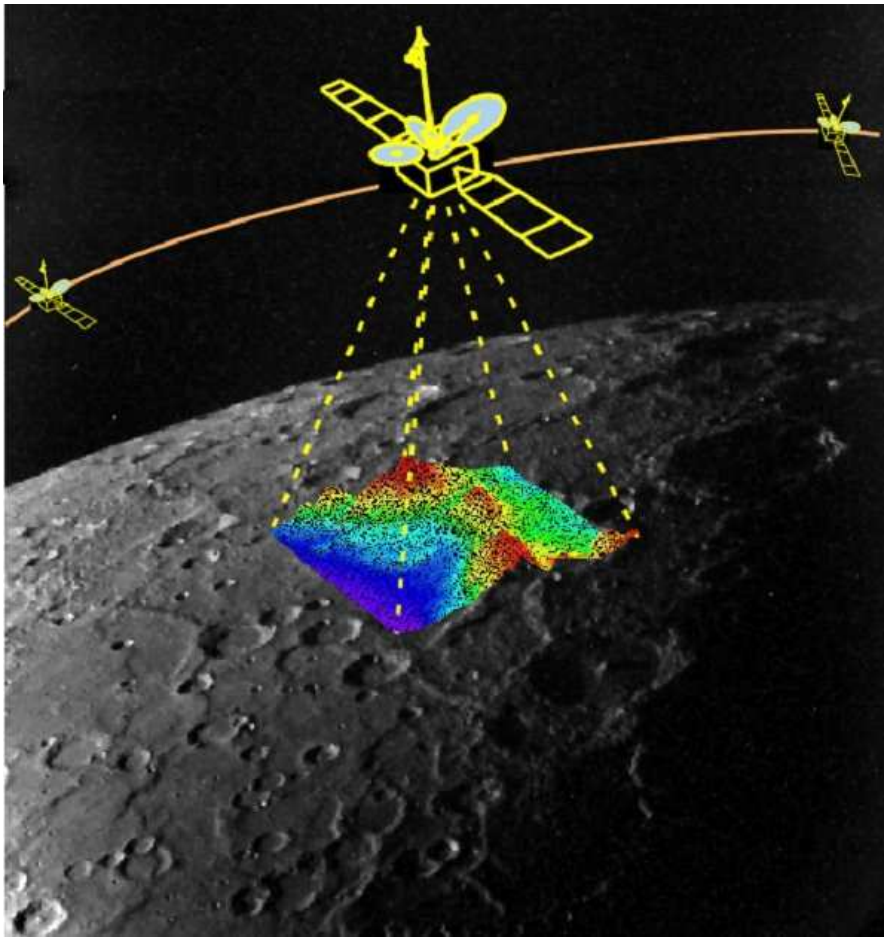


Figura III.1 – STC push-frame imaging della superficie di Mercurio.

III.2 VISIONE STEREOSCOPICA DI STC

La normale percezione visiva dell'uomo avviene in modo binoculare, cioè attraverso i suoi due occhi. Ciascuno dei due occhi che possediamo è già un perfetto meccanismo visivo a sé stante, pertanto ogni volta che osserviamo un oggetto che ricade nel nostro campo visivo, in realtà noi lo vediamo due volte: una volta con l'occhio destro ed una volta con l'occhio sinistro. Poiché gli occhi sono posizionati sulla faccia ad una distanza di circa 6,5cm l'uno dall'altro, ogni occhio vede il medesimo oggetto da una angolazione prospettica leggermente diversa dall'altro. A questo punto poi interviene il cervello che sovrappone le due immagini, risultanti dalla visione dell'occhio destro e dell'occhio sinistro, e le elabora in una sola, fondendo le parti identiche e inserendo in un modo intellegibile le differenze risultanti fra di loro.

Tale processo viene chiamato scientificamente "stereopsi", cioè fusione di due immagini.

In tale modo il nostro cervello costruisce una visione tridimensionale dell'oggetto stesso, partendo dalle due visioni bidimensionali che gli occhi producono mentre osservano l'oggetto da differenti

prospettive.

Avere la visione tridimensionale di un oggetto vuol dire considerare non solo la sua larghezza e la sua altezza, ma anche la sua profondità, cioè la distanza alla quale è situato l'oggetto nello spazio in relazione alla nostra posizione.

Il principio base del processo di elaborazione delle immagini della Stereo Camera del sistema SIMBIOSYS è il medesimo di quello dell'occhio umano: la posizione relativa delle due camere permette, con un software dedicato, di riprodurre anche la profondità della superficie che la camera andrà ad osservare.

Le camere di STC osservano la superficie del pianeta per più volte sotto angolature differenti, in modo da poter poi integrare tra loro le diverse immagini, al fine di ricreare anche la terza dimensione.

Una ricostruzione ideale del processo di elaborazione delle immagini è riportata nella Fg.III.2: indicando con α l'angolo formato dall'orientazione di ciascuna camera con la verticale passante per il punto che si osserva e conoscendo la distanza che intercorre tra le due camere (L nel primo caso e L' nel secondo), è possibile ricavare informazioni sull'elevazione (h) dell'oggetto che viene osservato secondo le formule riportate a lato.

Si tratta di una ricostruzione semplicistica per spiegare l'idea alla base dell'elaborazione delle immagini.

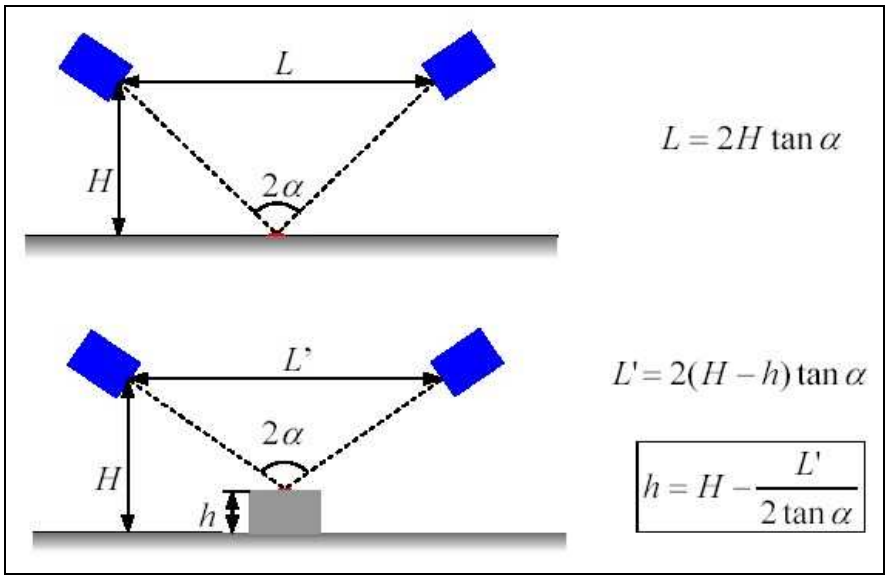


Figura III.2 – STC push-frame imaging della superficie di Mercurio.

Il processo reale è molto più complesso in quanto l'osservazione è fatta su una superficie estesa e non su un punto; inoltre sono da considerarsi anche i problemi dovuti alla sovrapposizione delle immagini

e allo spostamento dello spacecraft nel corso dell'acquisizione.

Per l'acquisizione si utilizza una strategia di osservazione detta "quasi push-frame": ogni canale di STC fotografa, per ciascuna delle lunghezze d'onda dei filtri, una porzione di superficie pari a quella "vista" nel rispettivo campo del sensore.

Affinché l'immagine sia ben definita, bisogna limitare la "spalmatura" dei pixel dovuta al movimento di MPO lungo la propria orbita. Ciascun pixel dovrà quindi essere letto in meno di 10ms per garantire la qualità dell'immagine fotografata.

Nella figura sotto si ha un esempio della procedura di acquisizione delle immagini da parte dello strumento.

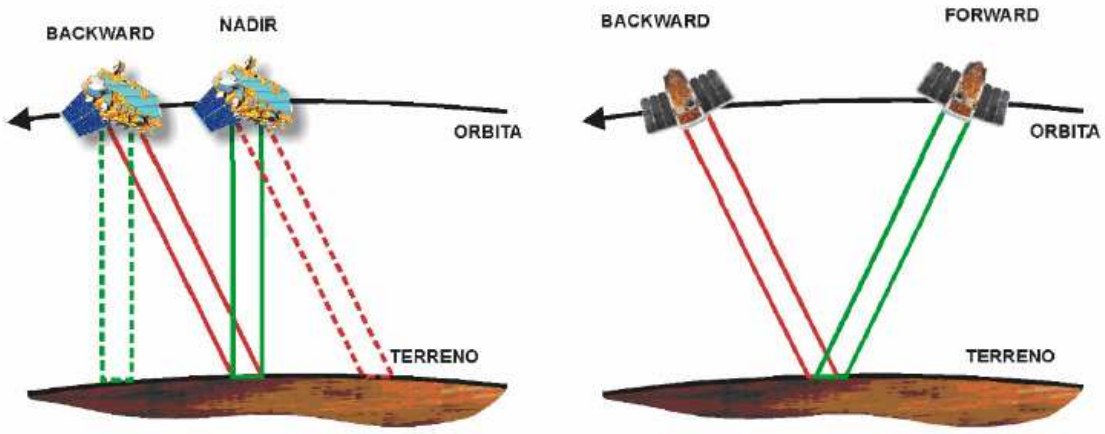


Figura III.3 – Metodo di acquisizione delle immagini.

III.3 CONFIGURAZIONE OTTICA DI STC

Il disegno ottico della camera è stato realizzato non solo allo scopo di raggiungere gli obiettivi scientifici sopra descritti, ma anche considerando il risparmio in termini di massa, ingombro e potenza necessaria.

Ciò giustifica l'adozione di un unico rivelatore e di elementi comuni ai due canali dello strumento.

Le principali caratteristiche dello strumento sono riassunte nella Tab.III.1.

Prima di giungere all'attuale configurazione ottica, sono state analizzate diverse soluzioni, per determinare quella che comportasse i migliori compromessi tra qualità delle immagini, minor ingombro complessivo, migliore livello della EEF (Ensquared Energy Function) che deve essere comunque superiore al 70%, minimi problemi di cross-talking tra i canali, soppressione della luce diffusa, migliori proprietà delle superfici.

Tabella III.1 – Caratteristiche principali della stereocamera.

Parametri	**Unità**	**Valore/descrizione**	**Commenti**
Apertura	mm	15	Diametro
Lunghezza focale	mm	90	
Numero focale	#	6.0	
Field of view	°	5.3x4.5	Cross e along track
Oscurazione centrale	%	0	
Pixel IFoV	$mrad^2$	113 x 116	Al centro del FoV
Range spettrale	nm	410 - 930	
Filtri bandapassante	nm	20 / 250	3 banda larga / panchromatic
Canali spettrali	nm	Pancromatico (700) 420, 550, 750, 920	6 filtri: 2 Pancromatici, 420,550, 750,920
Dispersione spettrale		N/A	
Efficienza dello specchio	%	> 80	
Materiale specchio		Al	
Coating specchio		Al + MgF2	
Diffrazione EE per pixel	%	> 70	
Distorsione	%	< 1.6	Su tutto il FoV per ogni filtro

Il sistema è costituito da due camere, posizionate nel piano “along track”, secondo angoli di +20° (per la camera foreward) e –20° (per la camera backward) rispetto alla direzione del Nadir.

La scala di 50m/px al periermio è raggiunta grazie ad una lunghezza focale di 90mm.

Essa permette di avere una EEF superiore al valore minimo richiesto del 70%.

Il campo di vista nominale della stereo camera è 5.3° (cross track) x 4.5° (along track).

Il fascio di raggi proveniente dalla superficie di Mercurio entra all’interno della camera attraverso due pupille d’ingresso. Ogni canale ha una propria pupilla di forma circolare avente un diametro di 15mm.

Le pupille, posizionate inizialmente in corrispondenza del fuoco dello specchio primario relativo a ciascun canale, sono state successivamente spostate di 26 mm nella direzione along-track, ovviando così ai problemi di cross-talk tra i canali e migliorando le prestazioni nei confronti della luce diffusa.

Dopo un primo sistema di baffles che limita gli effetti della luce diffusa, e antecedente i due prismi, è stato posizionato un filtro infrarosso per bloccare il contributo termico radiativo all’interno della camera.

I raggi che entrano dalle due pupille d’ingresso risultano inclinati di 20° rispetto alla direzione del Nadir. Per raddrizzare il fascio, in ciascuno dei due canali, è stato posizionato un prisma romboidale che ruota i raggi in modo tale che risultino divergenti di 3,75° rispetto all’asse ottico della camera all’uscita da essi.

Tale rotazione è ottenuta disponendo secondo angoli opportuni le superfici riflettenti e quelle trasparenti dei due prismi.

I prismi sono dimensionati considerando un'apertura della pupilla di ingresso con diametro di 15mm e un campo di vista esteso di 5,3°x5°.

Essi sono inoltre insensibili alla rotazione rispetto a tutti e tre gli assi di riferimento e di conseguenza non vengono introdotti errori di co-registazione tra i canali.

Immediatamente dopo i prismi, si trova un doppietto comune a entrambi i canali. Si tratta di una coppia di lenti, una biconvessa e una piana-concava.

Le lenti sono realizzate in Fused Silica, materiale resistente alle radiazioni.

La funzione principale del doppietto è di correggere le residue aberrazioni dello specchio primario. Considerando il sistema ottico nel suo insieme si riesce ad avere un'aberrazione cromatica trascurabile in tutto il range spettrale 410-930nm.

Per limitare l'ingombro della camera sono stati posizionati due specchi che fanno cambiare direzione ai raggi, compattando la struttura, ma lasciando invariate le posizioni delle due pupille.

Lo specchio primario, comune a entrambi i canali, ha una lunghezza focale di 90mm e una superficie riflettente di forma sferica.

Il materiale selezionato è lega di alluminio: esso è il materiale più appropriato per uno specchio nel caso in cui anche il banco ottico dello strumento sia realizzato in lega di alluminio. In questo modo gli effetti termici, come la perdita di messa a fuoco e il decentramento causati da variazioni di temperatura, sono auto-compensati.

Anche lo specchio secondario è un elemento comune a entrambi i canali. Esso piega il fascio di raggi verso il rivelatore.

Appena prima del rivelatore si trova una coppia di lenti di campo correttive realizzate in fused silica, sono comuni a entrambi i canali.

Lo scopo delle lenti è correggere la curvatura del campo senza forzare la sfericità della superficie dello specchio primario e la forma del doppietto stesso.

Infine, si trovano i filtri che selezionano la radiazione alle lunghezze d'onda prestabilite: 420nm, 550nm, 750nm e 920nm, ciascuno con 20nm di banda, e due filtri pancromatici centrati a 700nm con una banda di 200nm. I sei filtri sono depositati in strisce larghe approssimativamente 1,4mm (tranne che per il pancromatico per il quale sono più larghe) su un vetro fino posto davanti al sensore.

Nella seguente tabella si riportano le specifiche generali di STC.

III.4 IL SENSORE DELLA STEREOCAMERA

Il sensore è del tipo APS ("Active Pixel Sensor") da 2048x2048 pixel, ciascuno dei quali è un quadrato di dimensioni 10µm per lato.

Tabella III.2 – Specifiche della stereocamera.

SIMBIO-SYS STC - Stereo imaging Channel			
Obiettivi	Rappresentare tutta la superficie del pianeta (copertura globale) con campionatura a meno di 100m/px, in cinque diverse bande spettrali		
Descrizione generale	Camera a media risoluzione per immagini stereo e a colori		
Parametri	**Unità**	**Valore/Descrizione**	**Note**
GENERALE			
P/L di riferimento		AMIE (SMART 1)	
Tipo di camera		Array scanner	
Tipo di ottica		Concezione innovativa	
RISOLUZIONE			
Risoluzione spettrale	$\lambda/\Delta\lambda$	N/A	
Risoluzione angolare	µrad/px	125	
Risoluzione spaziale	m/px	50	@400 km di distanza
Dwell time at periherm	ms	19	
Dwell time at apoherm	ms	140	
CONTROLLO TERMICO			
Filtro per rigetto calore	N/A	ITO	
Area	cm^2	1.8	
Carico di calore all'apertura	W	2.5	
Calore rigettato	%	80.0	
Calore entrato	W	0.5	
Gray filter	%	~10.0	
Assorbimento nei filtri	W	0.4	
Calore assorbito dagli strumenti	W	0.0	
Temperatura operativa	°C	20	
Stabilità della temperatura operativa	°C/h		
PHYSICAL			
Locazione preferita	N/A	Nadir	
Massa totale	kg	0.6	
POTENZA			
Potenza media totale	W	1	
Detector + elettronica	W	1	
Refrigeratori	W	-	
DATA RATE/VOLUME			
Volume di dati	Gbyte	74.81	in oltre 6 mesi
Fattore di compressione	#	14	

La scelta di un sensore di questo tipo invece che di un CCD è legata a diversi fattori: un sensore APS risulta più tollerante nei confronti della radiazione. Nel caso in cui un pixel di un CCD venga danneggiato per effetto delle radiazioni, si ha la perdita dell'intera riga (o colonna, a seconda della modalità di lettura) con la formazione delle tipiche file nere di pixel sull'immagine. In un sensore APS invece, la perdita di un pixel rimane limitata ad esso, senza influire sul trasferimento delle cariche dei pixel adiacenti.

Per tali motivi, l'impiego dei CCD in ambito spaziale inizia ad essere sempre più abbandonato.

Lo svantaggio nell'uso dei sensori APS è la minore qualità dell'immagine.

Il sensore della STC ha un Fill-factor di 100%: il Fill-factor (FF) esprime la percentuale dell'area complessiva del pixel che è attiva (la superficie occupata dal fotodiodo) rispetto all'area totale.

Le caratteristiche del sensore sono riportate nella seguente tabella.

Tabella III.3 – Caratteristiche del sensore della stereocamera.

Sensore		APS	
Pixel line		2048	
Pixel per line		2048	
Dimensione pixel	µm	10	
Pixel fill factor	%	100	
Quantum Efficiency	%	55	@ 500 nm
Full well capacity	e^-	10^5	
Temperatura operativa	°C	+20° ÷ -20°	
Scale per pixel	m/px	50	@ 400 km
Smear	px/s	20	@ 400 km
Tempo di esposizione	ms	<5	
Durata acquisizione immagini	s	<1	

III.5 PRESTAZIONI OTTICHE DELLA STEREOCAMERA

Le prestazioni ottiche dello strumento sono state verificate secondo le caratteristiche riportate nella tabella sottostante.

In Fg.III.4 è riportata la disposizione dei filtri e i vari FoV dei canali spettrali con le posizioni relative tra di essi. I due campi di vista, relativi ai due ingressi, sono separati secondo un angolo 2,5°; nel rivelatore le due immagini risultano distanziate di 3,93mm equivalenti a 393 pixels.

III.6 DESIGN OPTO-MECCANICO DELLA STEREOCAMERA

Gli elementi ottici della stereocamera possono essere divisi in due gruppi principali, una parte di

essi si troverà all'interno dei baffles, mentre l'altra sarà all'interno di una struttura di una lega di alluminio (Al7075-T6) che consentirà, data l'elevata conducibilità termica, di uniformare il più possibile la temperatura tra i vari elementi ottici.

Tabella III.4 – Campi di vista della stereocamera.

Canale spettrale	FoV (deg)	Range spettrale (nm)	Dimensione Pixel (mm^2)
NIR 2	± 2,65° (across) From –6,25° to –5,75° (along)	910 – 930	0,01x0,01
Verde	± 2,65° (across) From –4,95° to –4,45° (along)	540 – 560	0,01x0,01
Pancromatico	± 2,65° (across) From –3,65° to –1,25° (along)	600 – 800	0,01x0,01
Pancromatico	± 2,65° (across) From 1,25° to 3,65° (along)	600 – 800	0,01x0,01
Blu	± 2,65° (across) From 4,45° to 4,95° (along)	410 – 430	0,01x0,01
NIR 1	± 2,65° (across) From 5,75° to 6,25° (along)	740 – 760	0,01x0,01

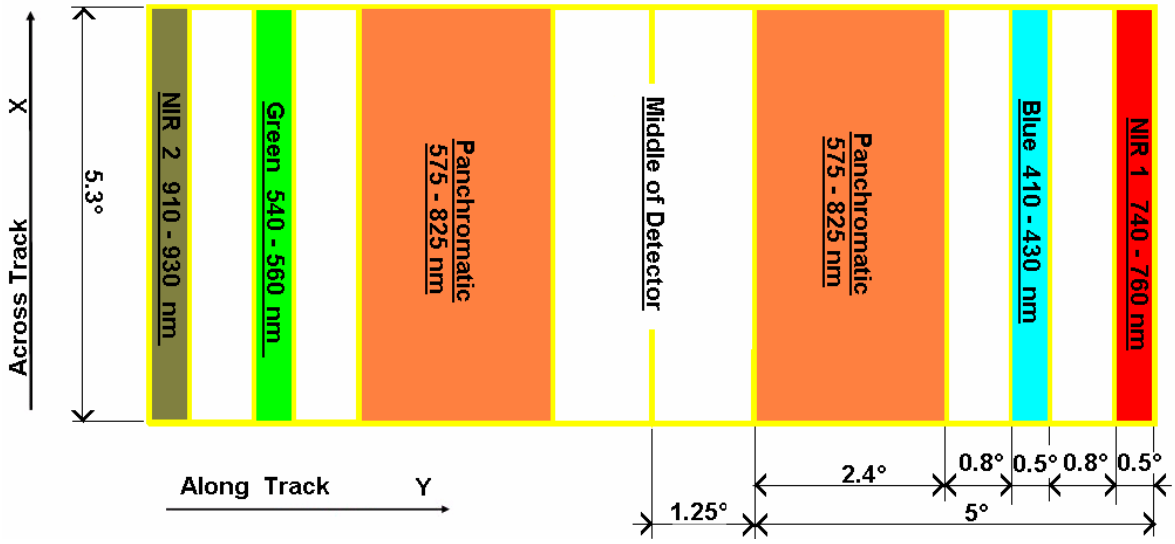
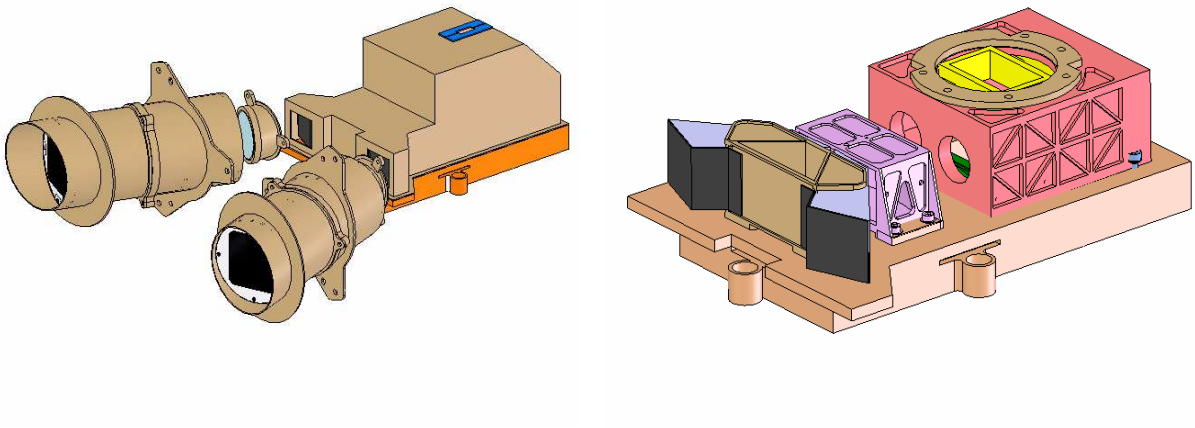


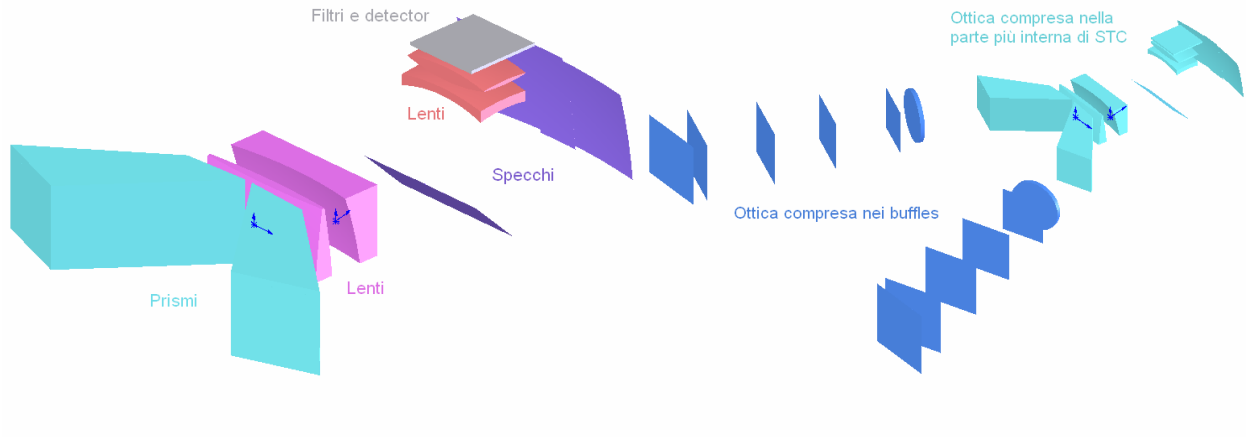
Figura III.4 – Filtri e Fields of View della stereocamera.

In Fig.III.5 è inoltre possibile vedere i particolari dei sistemi di montaggio delle ottiche, queste ultime sono illustrate in Fig.III.2.



(a) (b)

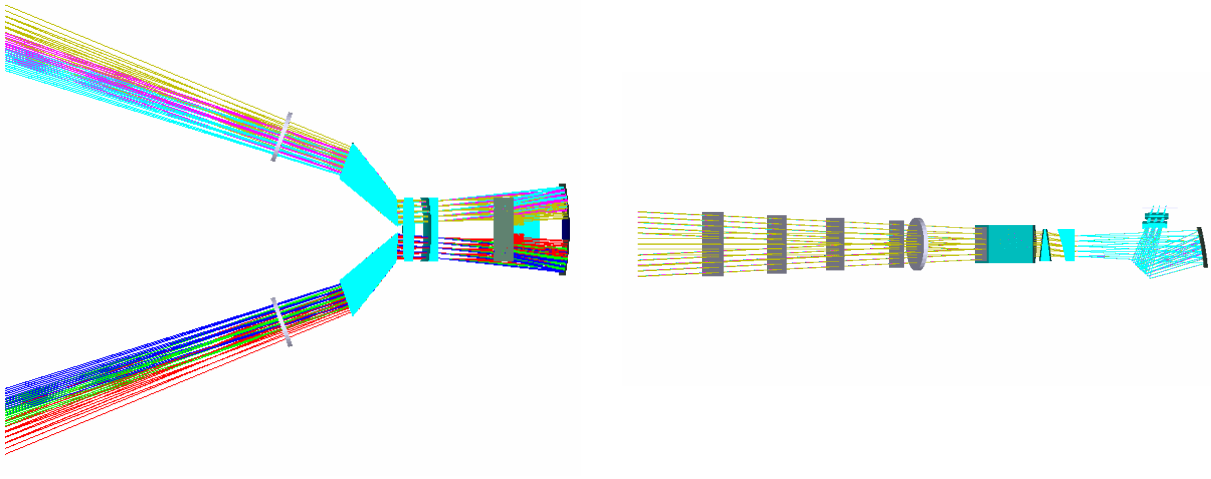
Figura III.5 – Particolari del disegno opto-meccanico della stereocamera: (a) disegno complessivo comprensivo dei baffles esterni; (b) parte della stereocamera compresa nella struttura più interna in lega di alluminio.



(a) (b)

Figura III.6 – Particolari degli elementi ottici della stereocamera: (a) disegno ottico complessivo comprensivo dei baffles esterni; (b) parte delle ottiche della stereocamera comprese nella struttura più interna in lega di alluminio.

In Fig.III.7 è possibile vedere il particolare del ray-trace della stereocamera per tutti i canali.



(a) (b)

Figura III.7 – Ray-trace della stereocamera: (a) vista dall'alto; (b) vista di profilo.

Capitolo IV

ANALISI TERMO-ELASTICHE DELLA STEREOCAMERA

IV.1 SCOPO DELLE ANALISI TERMO-ELASTICHE

L'utilizzo della stereocamera avverrà in ambiente spaziale ostile, per questo la temperatura non sarà costante durante la missione e soprattutto sarà diversa da quella di integrazione dello trumento a +20°C. Ciò potrà provocare delle variazioni dimensionali sui componenti della stereocamera e,conseguentemente, una variazione della posizione e dell'orientazione delle ottiche.

In fase di progetto sono state determinati degli intervalli di temperatura entro i quali si troverà la stereocamera, chiamata *temperatura non operativa*, ed entro i quali funzionerà la stereocamera, detta *temperatura operativa* (vedi Tab.IV.1).

Tabella IV.1 – Temperature limite della della stereocamera.

TEMPERATURE LIMITE DELLA STEREOCAMERA					
T non operativa	***Tmax***	+40°C	**T operativa**	***Tmax***	+30°C
	Tmin	-30°C		***Tmin***	-20°C

Le differenze di temperatura che potrebbero crearsi tra l'interazione della stereocamera ed il suo funzionamento, causando una disposizione delle ottiche diversa, seppur di poco, potrebbero degradare le caratteristiche ottiche dello strumento, in termini di dimensione degli spot diagrams, di curve MTF, di Diffraction Ensquare Energy e di posizionamento degli spot sull'immagine presente sul detector; oltre a questi parametri potrebbero venire modificati anche la focale dello strumento e la matrice di distorsione delle ottiche. Questi effetti possono ripercuotersi sulla precisione della ricostruzione tridimensionale della superficie di Mercurio, causando la variazione dei parametri intrinseci della stereocamera pensata come telecamera pin-hole.

Grazie alle analisi termo-elastiche è possibile stimare l'entità degli spostamenti e delle rotazioni che potrebbero aver luogo a seguito delle differenze di temperatura.

In questa trattazione si considera la temperatura costante lungo tutti i componenti della stereocamera, in quanto essendo questa il lega di alluminio, e cioè in un materiale caratterizzato da una elevata conducibilità termica, si ipotizza una distribuzione uniforme della temperatura.

I risultati che verranno, quindi, di seguito mostrati si riferiscono ad analisi FEM eseguite usando come pre e post-processore UGS Femap e come processore MSC Nastran, dove si considerano due tipi di carichi termici caratterizzati da una temperatura iniziale T_i=+20°C e dalle due temperature finali T_{fc}=+30°C e T_{ff}=-20°C. Successivamente è stata effettuata un'altra analisi ponendosi nel peggiore dei due casi, e cioè quello freddo, introducendo sugli elementi della stereocamera un gradiente termico di 5°C.

Nella seguente figura è possibile vedere la configurazione degli elementi della stereocamera posti sotto studio, e cioè i due prismi, il primo gruppo di lenti ed i due specchi.

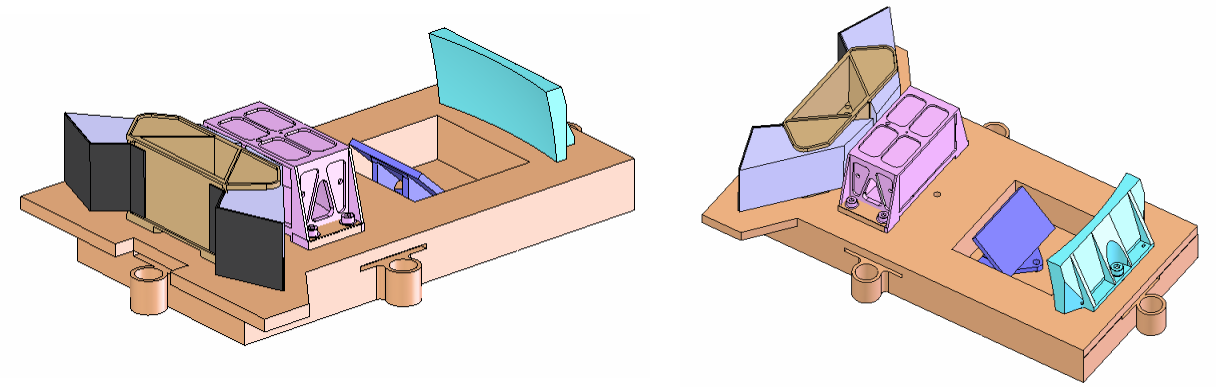


Figura IV.1 – Particolari dei componenti di montaggio delle ottiche della stereocamera.

Le mesh degli elementi sono state create in diversi materiali, Al7075-T6 e Fused Silica, le cui caratteristiche sono elencate in Tab.IV.2.

La base della stereocamera è stata vincolata in un punto centrale sottostai ad essa e nei quattro punti laterali dove alloggeranno le viti, tuttavia non si è riscontrata alcuna differenza sensibile tra vincolare la base solo nel punto centrale con o senza i quattro punti laterali, in quanto le fessure previste da progetto permettono una differenza nelle dilatazioni termiche della base lungo la dimensione più lunga di 1μm.

Le analisi sono state eseguite ipotizzando le lenti vincolate alla struttura tramite colla in otto punti ciascuna due per lato, ed i prismi vincolati con colla in due punti ciascuno rispettivamente sopra e sotto.

Questi vincoli hanno evidenziato delle tensioni tra struttura e elementi ottici superiori 500MPa, in quanto i coefficienti di dilatazione termica della lega di alluminio e del Fused Silica sono diversi. Inoltre

(vedi Cap.VI) la colla, comportandosi rigidamente causa delle deformazioni alle ottiche che si ripercuotono in modo negativo sulla dimensione degli spot diagrams sul detector.

A questo scopo sono stati ideati dei vincoli cinematici ad hoc che consentano da una parte la diminuzione degli stress e dall'altra la conservazione delle proprietà ottiche dello strumento. Essi verranno illustrati nei paragrafi successivi.

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni FEM suddivise in base al vincolo utilizzato tra struttura in lega di alluminio ed elementi ottici in Fused Silica ed in base al carico termico applicato. Gli elementi ottici analizzati sono i prismi, le prime due lenti ed i due specchi.

IV.2 ANALISI TERMO-ELASTICHE CON VINCOLO COLLA

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi termo-elastiche considerando come vincolo tra le lenti, i prismi e la struttura della colla.

Successivamente vengono riportati i risultati considerando all'interno della stereocamera una temperatura variabile da T_f=-15°C a T_f=-20°C nel caso freddo, e da T_f=30°C a T_f=35°C nel caso caldo. La temperatura iniziale resta T_i=20°C.

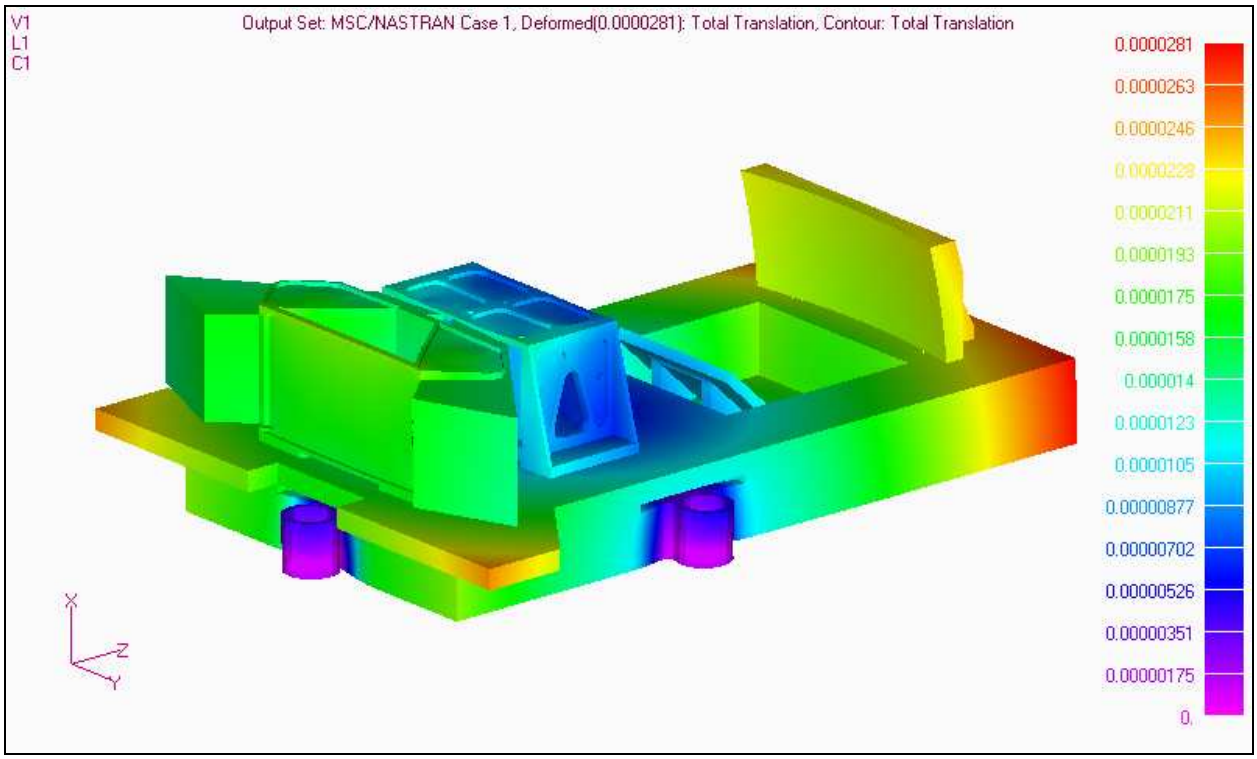


Figura IV.2 – Traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincolo colla da T_i=20°C a T_f=30°C.

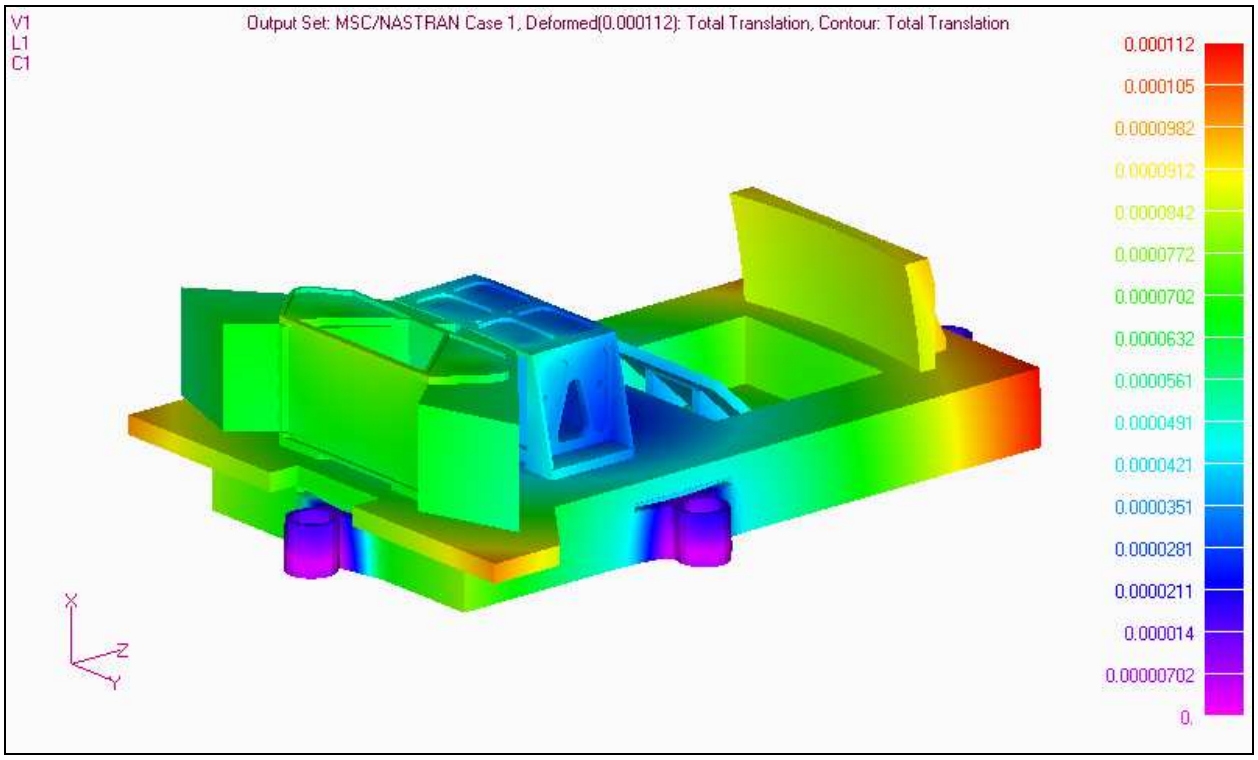


Figura IV.3 - Traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincolo colla da T_i=20°C a T_f=-20°C.

IV.3 ANALISI TERMO-ELASTICHE CON VINCOLI CINEMATICI

IV.3.1 Vincoli cinematici applicati alle lenti ed ai prismi

Un vincolo di natura rigida come la colla, in seguito a differenze di temperatura di questa entità, causa delle tensioni sugli elementi ottici di notevole entità, complessivamente superiori a 500MPa nel caso freddo. Dalle caratteristiche del Fused Silica riportate in Tab.IV.3 si può notare come uno stato tensionale di questo tipo renda possibile la rottura delle lenti e dei prismi. Per questo è necessario studiare accuratamente un sistema di vincolo che consenta con tali sbalzi termici l'integrità del sistema.

Adatto a questo scopo è l'utilizzo di vincoli cinematici, caratterizzati da una rigidezza minore dovuta alla loro forma e\o materiale. Tali vincoli possono essere paragonati a delle molle che consentono alla struttura in lega di allumino e alle ottiche di scalare le loro dimensioni senza creare tra di esse eccessive tensioni dovute alla differenza esistente tra i coefficienti di dilatazione termica.

Per evitare eventuali effetti di buckling i vincoli sono stati ideati con una forma totalmente curva. Si è pensato inoltre ad una configurazione idonea per ottenere una buona resistenza alle vibrazioni.

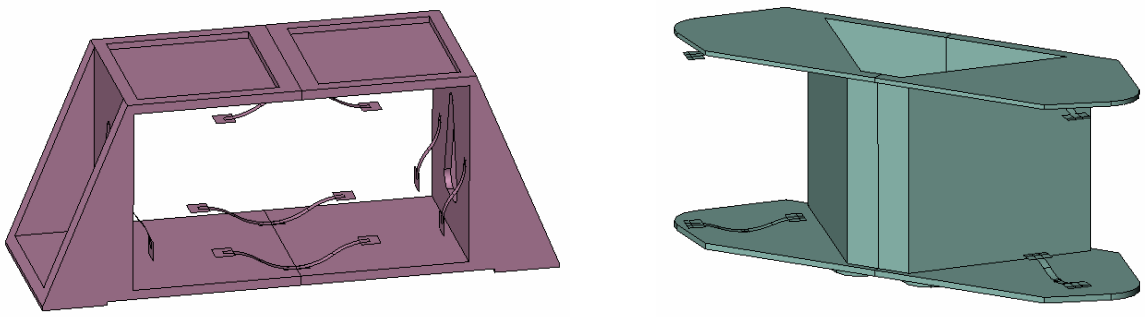
Tabella IV.2 – Proprietà fisiche, meccaniche e termiche della lega Aluminum 7075-T6 (fonte Matweb).

ALUMINUM 7075-T6			
Property	**Value**	**Unit**	**Considerations**
Density	2810	kg/m^3	AA Typical
Hardsess, Brinell	150		AA Typical, 500g load, 10mm ball
Hardness, Knoop	191		Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	53,5		Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	87		Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	175		Converted from Brinell Hardness Value
Ultimate Tensile Strength	572	MPa	AA Typical
Tensile Yield Strength	503	MPa	AA Typical
Elongation at Break	11	%	AA Typical, @Thickness 1,59mm, @Diameter 12,7mm
Modulus of Elasticity	71,7	GPa	AA Typical, Average of Tension and Compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus
Poisson Ratio	0,33		
Fatigue Strength	159	MPa	Completely reversed strength, RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	20 25 29	$MPa/m^{1/2}$	K (C) in S-L Direction K (C) in T-L Direction K (C) in L-T Direction
Shear Modulus	26,9	GPa	
Shear Strength	331	MPa	AA Typical
CTE, linear	23,6	μm/m°C	AA Typical, average over range (20°-100°C)
Specific Heat Capacity	960	J/kg°C	
Thermal Conductivity	130	W/mK	AA Typical at 77°F

Tabella IV.3 – Proprietà fisiche, meccaniche e termiche di Fused Silica (fonti Matweb e Schott AG Division Lithotec).

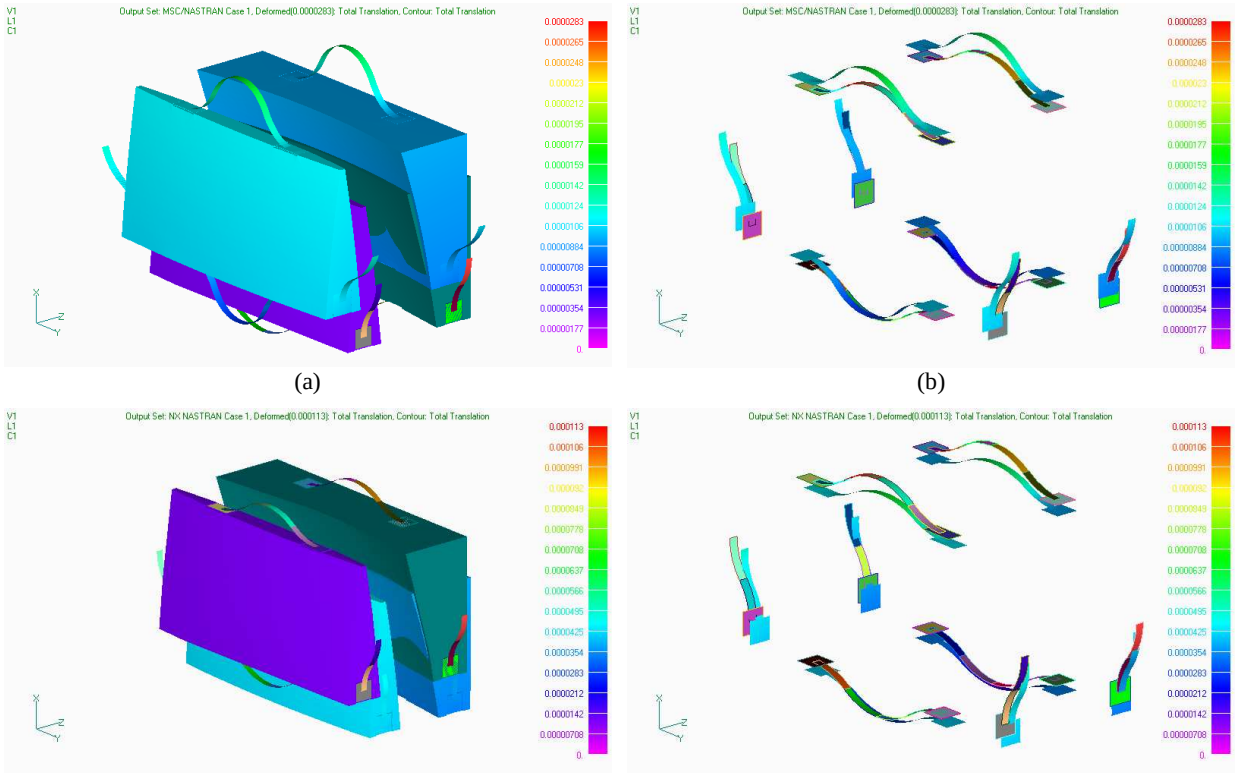
FUSED SILICA			
Property	**Value**	**Unit**	**Considerations**
Density	2210	kg/m^3	
Compressive Strength	1250	MPa	
Bending Strength	80-100	MPa	
Modulus of Elasticity	73,6	GPa	
Poisson Ratio	0,17		
Shear Modulus	31,4	GPa	
CTE, linear	4	μm/m°C	At -50°-50°C
Specific Heat Capacity	790	J/kg°C	At 20°-100°C
Thermal Conductivity	1,35	W/mK	At 20°F

Per il loro dimensionamento si è pensato di applicare la teoria della linea elastica a travi curve in modo da ottenere una relazione che consenta di determinare le caratteristiche geometriche della trave noto il materiale, e quindi lunghezza, raggio di curvatura e sezione, in funzione del carico termico imposto. In questo modo sono stati dimensionati dei vincoli che consentano di ottenere valori massimi di tensione sulle lenti e sui primi di 10MPa.



(a) (b)

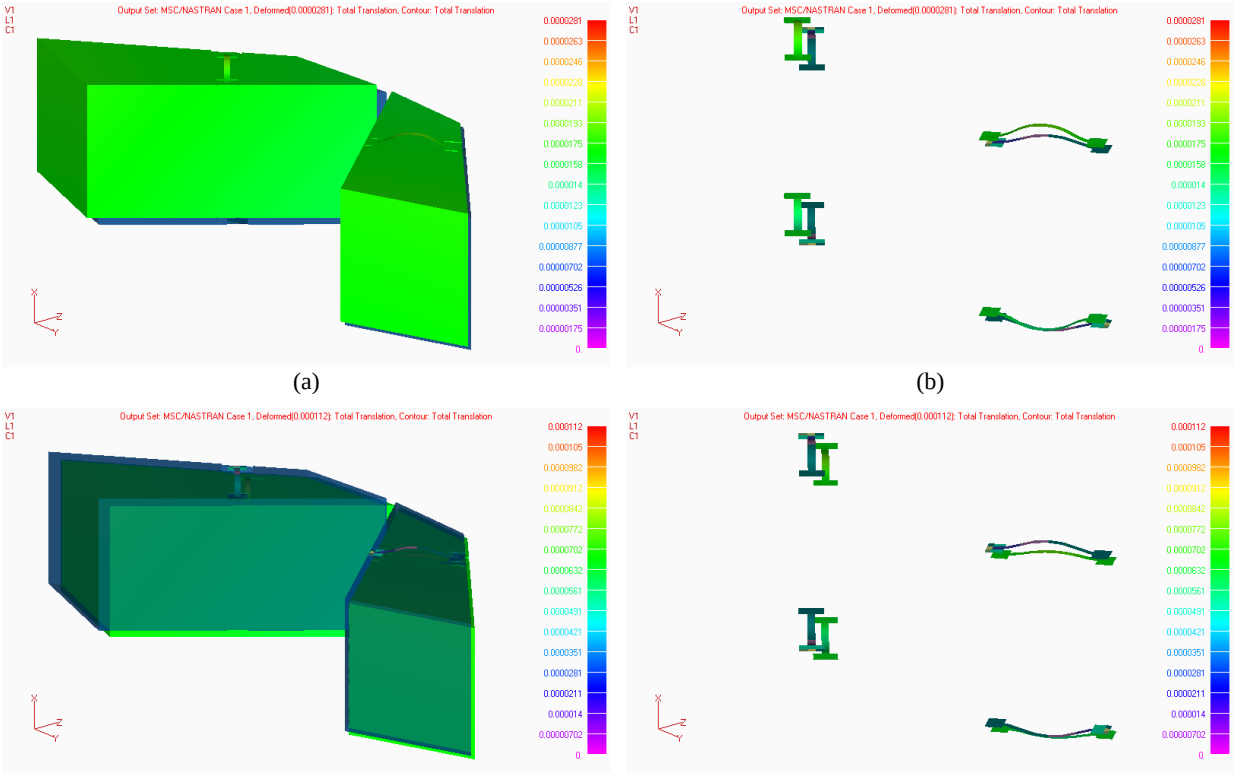
Figura IV.4 – Particolari dei vincoli cinematici applicati alle lenti (a) ed ai prismi (b) della stereocamera.



(a) (b)

(c) (d)

Figura IV.5 – Particolari delle traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincoli cinematici applicati alle lenti: (a), (b) da T_i=20°C a T_f=30°C; (c), (d) da T_i=20°C a T_f=-20°C.



(a) (b)

(c) (d)

Figura IV.6 – Particolari delle traslazioni risultanti dalle analisi termo-elastiche con vincoli cinematici applicati ai prismi: (a), (b) da T_i=20°C a T_f=30°C; (c), (d) da T_i=20°C a T_f=-20°C.

Capitolo V

CONVERSIONE DEI RISULTATI DELLE ANALISI TERMO-ELASTICHE IN SUPERFICI MATEMATICHE PER ANALISI RAYTRACE

V.1 POSSIBILI INTEGRAZIONI TRA CODICI FEM E RAYTRACE

I risultati delle analisi termo-elastiche condotte mediante software ad elementi finiti possono essere rappresentati da nodi ed elementi che costituiscono la mesh che esprime le geometrie degli oggetti da studiare.

Ad ogni nodo viene attribuito un risultato che, nel caso delle analisi termo-elastiche, rappresenta la sua roto-traslazione a seguito dei carichi termici e dei vincoli impostati.

Nel caso di solidi tridimensionali i risultati relativi alle simulazioni possono essere esportati con tutte le informazioni relative ai nodi di interesse. Per le analisi termo-elastiche svolte sulla stereocamera di SIMBIO-SYS le superfici utili ad essere esportate sono quelle relative agli elementi ottici, in quanto sono quelle che consentono di studiare la performance dello strumento mediante analisi ray-trace.

Le superfici dell'ottica sono state quindi esportate ed elaborate in ambiente Matlab consentendo di ricavare la loro forma deformata a causa dei carichi termici e dei vincoli esistenti utilizzando diversi tipi di equazioni; queste sono state importate in Zemax dove sono state condotte le analisi ray-trace per determinare come le caratteristiche della stereocamera varino in funzione delle analisi termo-elastiche.

V.2 OTTIMIZZAZIONE NON-LINEARE AI MINIMI QUADRATI PER LA DETERMINAZIONE DELLE EQUAZIONI DELLE SUPERFICI DELL'OTTICA

Un metodo per determinare l'equazione di una superficie tridimensionale note le coordinate dei nodi della sua mesh è quello di utilizzare un'ottimizzazione non-lineare ai minimi quadrati. Lo scopo di questo metodo è quello di "fittare" i dati disponibili modificando i coefficienti che determinano l'equazione matematica della superficie.

Se il modello matematico dei nodi può essere espresso nella forma:

$$z_i = f(x_i, y_i, \beta_j) \tag{5.1}$$

per ogni nodo i-esimo appartenente alla superficie e ogni coefficiente j-esimo del modello matematico, il metodo ai minimi quadrati riesce a risolvere il problema in modo ottimo quando è minima la somma *S* degli scarti quadratici dovuti alla differenza tra la coordinata effettiva di ogni nodo e quella calcolata matematicamente, cioè:

$$S = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 = \min \tag{5.2}$$

$$r_i = z_i - f\left(x_i, y_i, \beta_j\right) \tag{5.3}$$

dove n rappresenta il numero de nodi costituenti la superficie.

V.2.1 Superfici importabili in Zemax

Le superficie matematicamente ottenibili che possono essere importate in Zemax per studiare elementi ottici di forma rettangolare sono di tre tipi:

- polinomiale di grado massimo 20
- sferica
- piana

Esse possono essere rappresentate dalle seguenti equazioni:

$$z_i = \sum_{j=1}^{m}\left(\alpha_j \cdot x_i^j\right) + \sum_{j=1}^{m}\left(\beta_j \cdot y_i^j\right) + \sum_{k=1}^{m/2}\sum_{j=1}^{m/2}\left(\gamma_{jk} \cdot x_i^j \cdot y_i^k\right) + d \tag{5.4}$$

$$z_i = \frac{-\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - 4 \cdot \left(x_i^2 + y_i^2 + \alpha \cdot x_i + \beta \cdot y_i + d\right)}}{2} \tag{5.5}$$

$$z_i = \alpha \cdot x_i + \beta \cdot y_i + d \tag{5.6}$$

nel caso di equazione polinomiale di grado m (5.4), di equazione sferica (5.5), o planare (5.6).

Ovviamente l'interpretazione matematica di una superficie dipende dal sistema di riferimento considerato, per questo prima di elaborare i nodi degli elementi ottici è stato effettuato un cambiamento di

coordinate che permettesse di porsi nel sistema di riferimento impostato in Zemax. Il risultato del processo è quindi caratterizzato da due informazioni: un elenco dei coefficienti caratterizzanti l'equazione della superficie e un vettore che esprima lo spostamento del sistema di riferimento.

Il metodo viene sinteticamente illustrato in Fig.V.1.

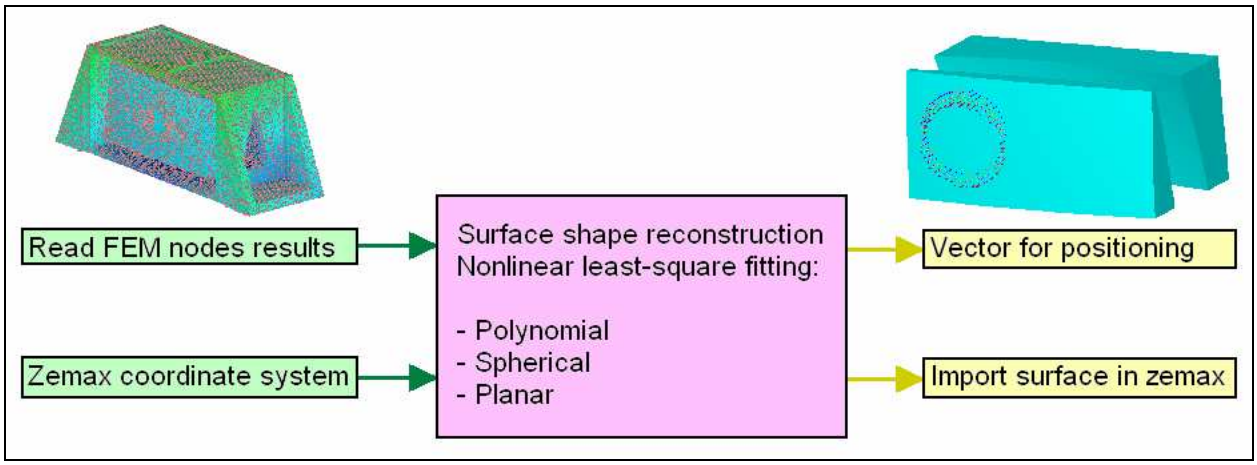
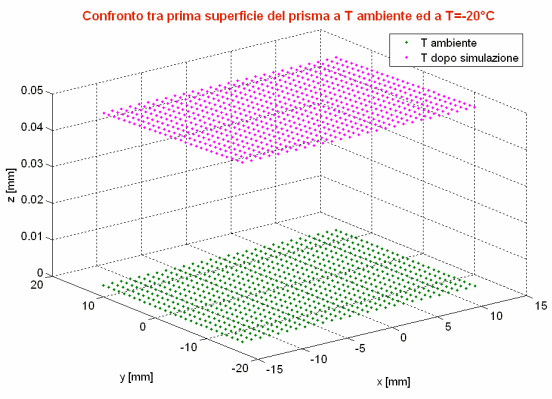


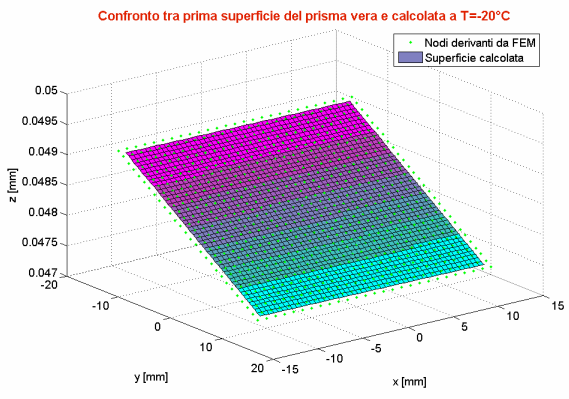
Figura V.1 – Schema del metodo utilizzato per importare in Zemax i risultati delle analisi termo-elastiche.

V.3 RISULTATI DI CALCOLO DELLE SUPERFICI

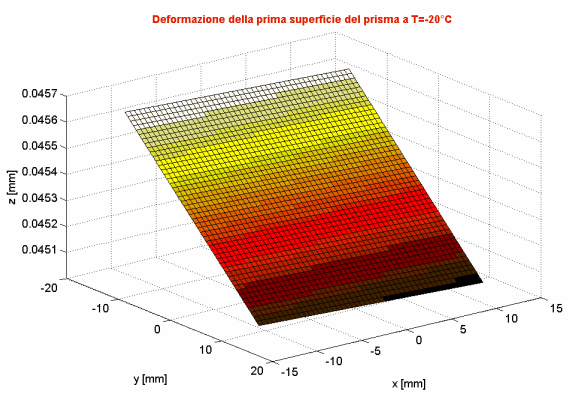
Di seguito vengono esposti alcuni dei risultati ottenuti dalla determinazione delle superfici degli elementi ottici in diversi casi di carico termico e sistema di vincolo: vengono rappresentati i nodi delle superfici prima e dopo le simulazioni, dei confronti con le superfici calcolate e gli scarti risultati dal calcolo.



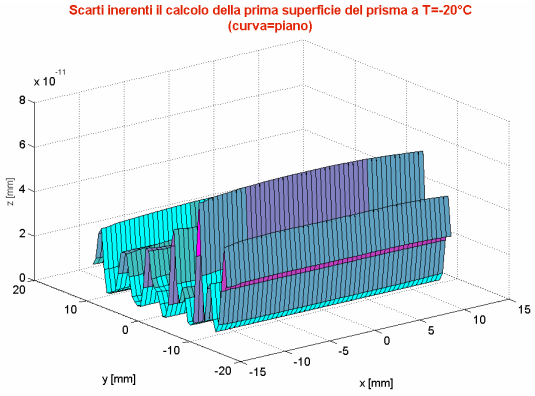
(a)



(b)

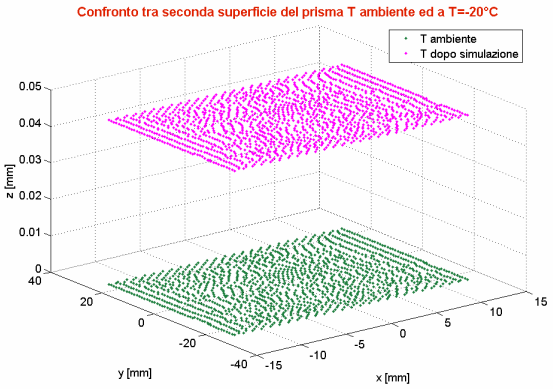


(c)

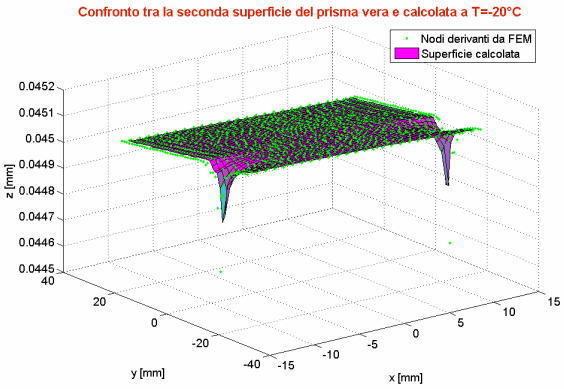


(d)

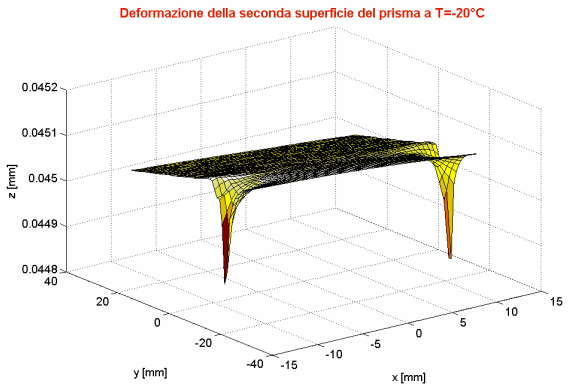
Figura V.2 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la prima superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un piano.



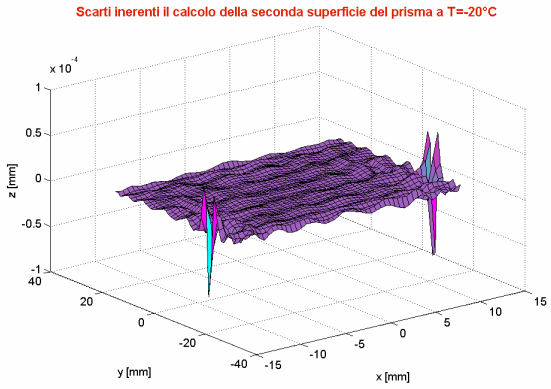
(a)



(b)

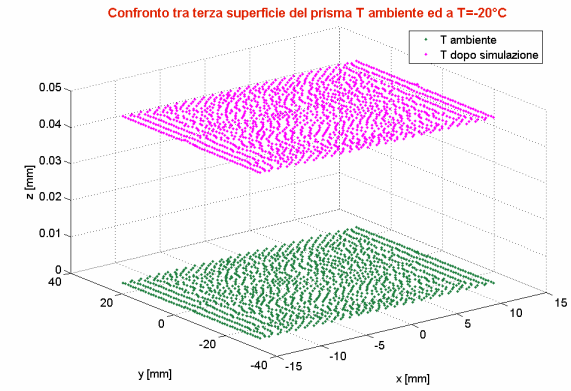


(c)

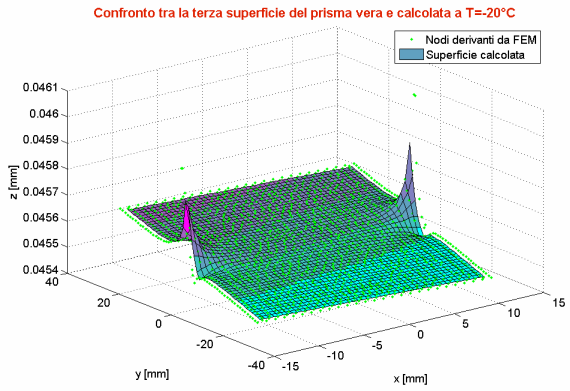


(d)

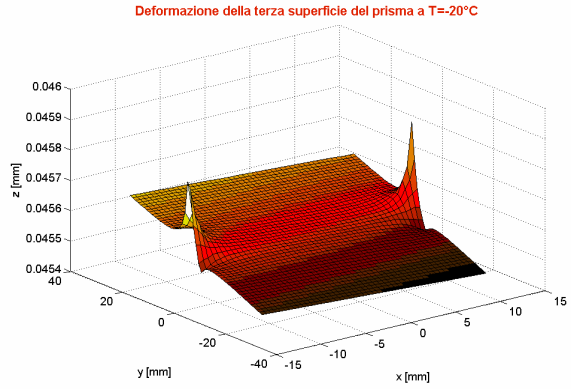
Figura V.3 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la seconda superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



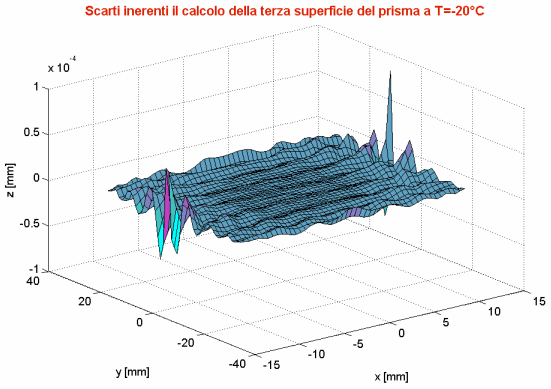
(a)



(b)

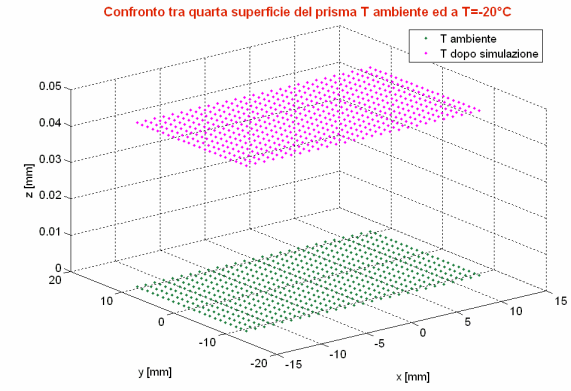


(c)

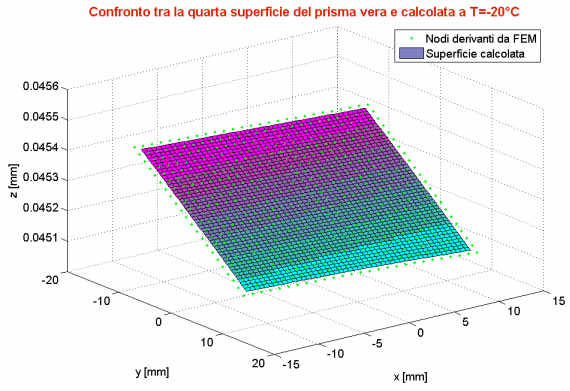


(d)

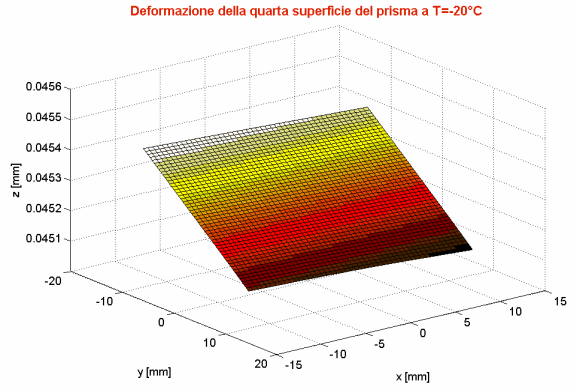
Figura V.4 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la terza superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



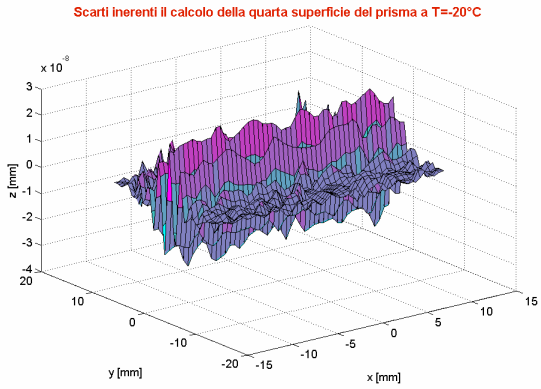
(a)



(b)

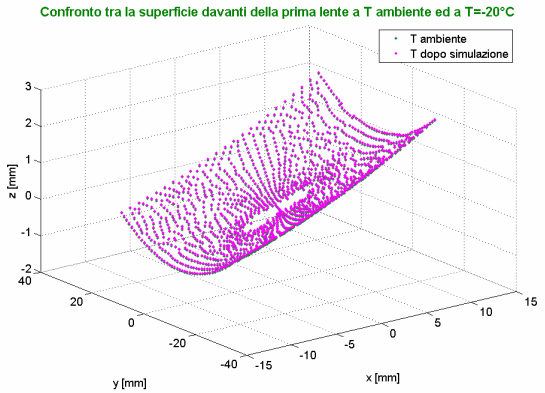


(c)

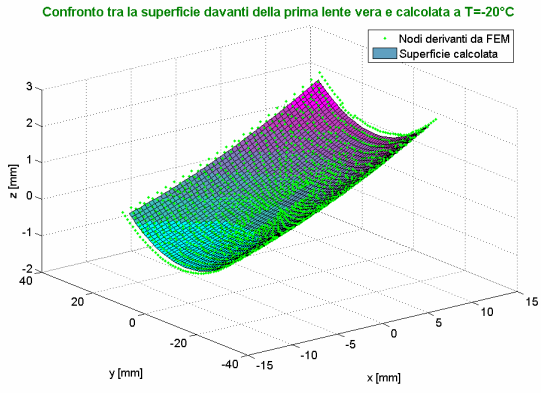


(d)

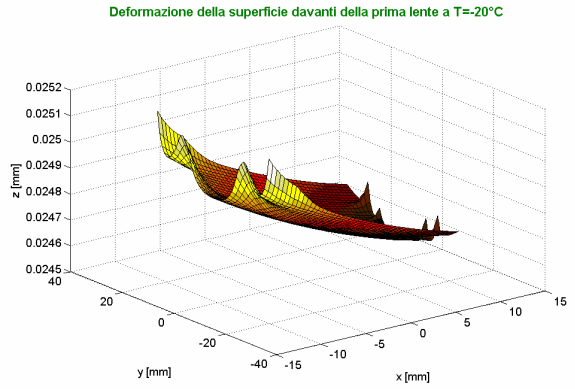
Figura V.5 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la quarta superficie di uno dei due prismi con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



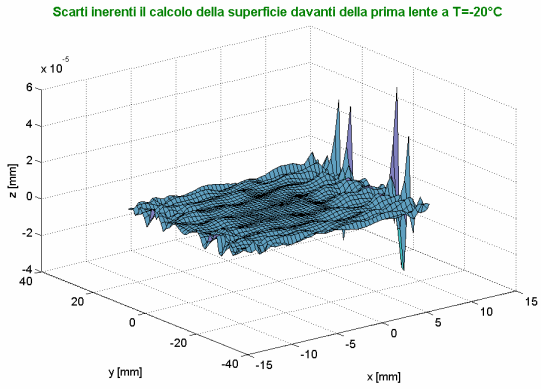
(a)



(b)

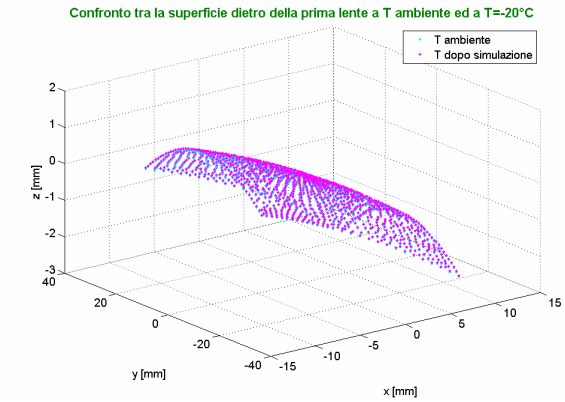


(c)

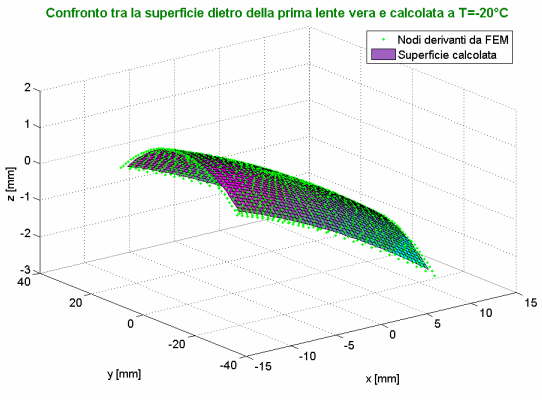


(d)

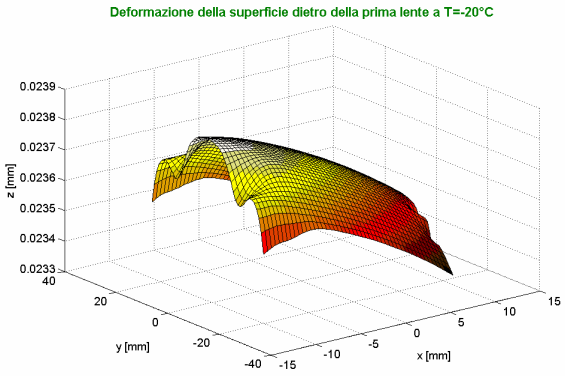
Figura V.6 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie davanti della prima lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



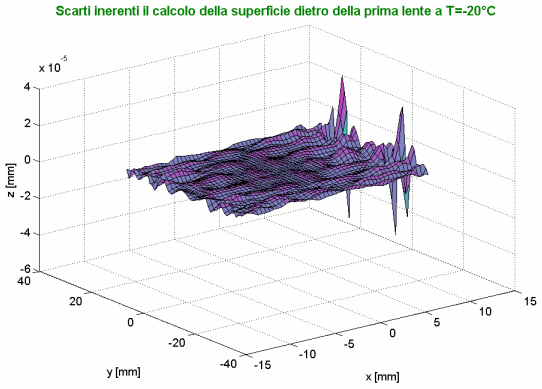
(a)



(b)

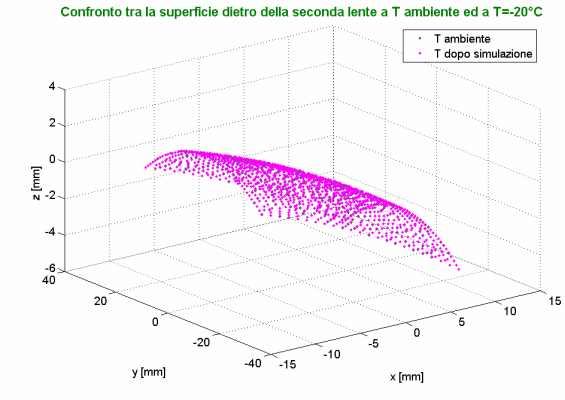


(c)

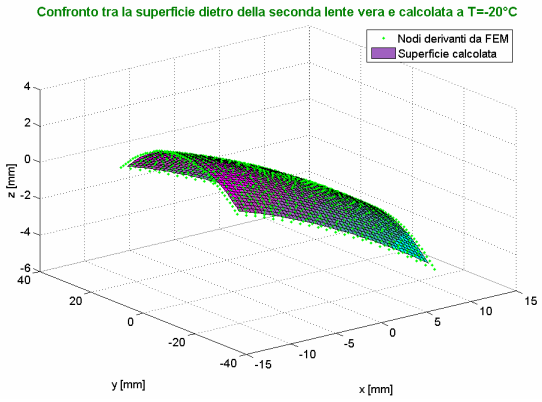


(d)

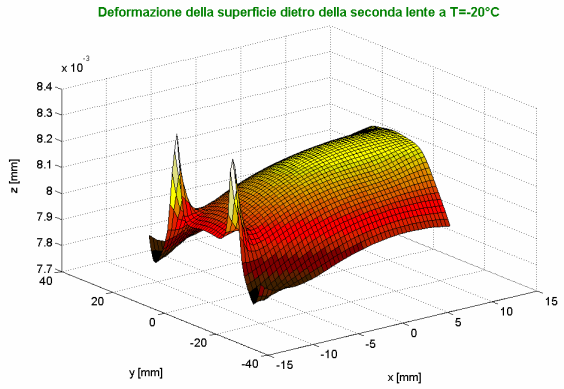
Figura V.7 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dietro della prima lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



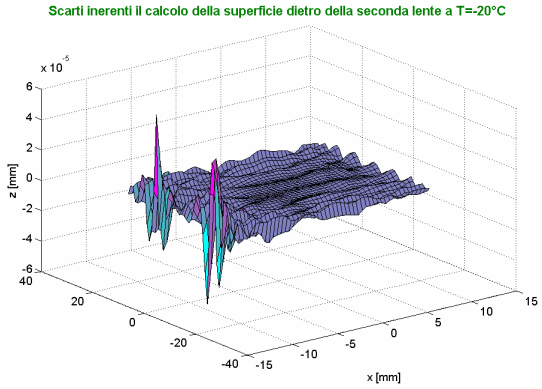
(a)



(b)

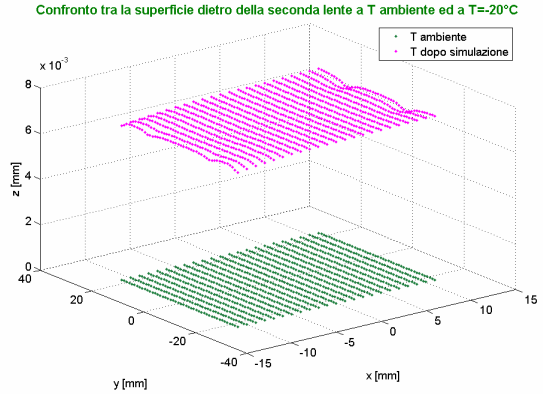


(c)

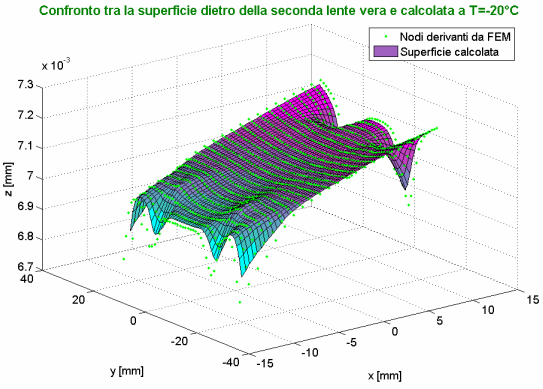


(d)

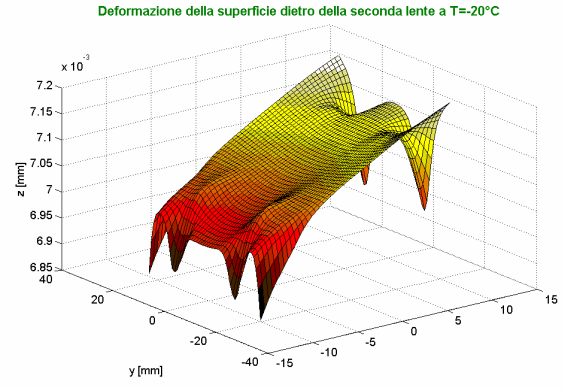
Figura V.8 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie davanti della seconda lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



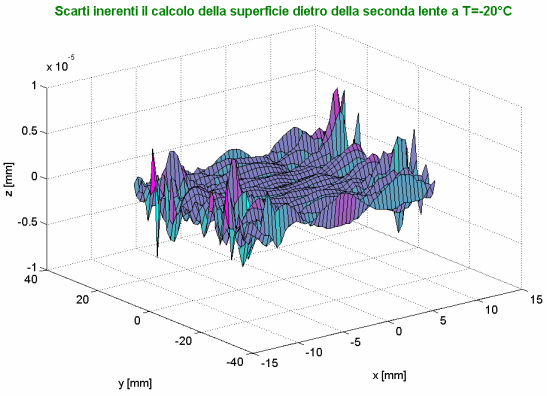
(a)



(b)

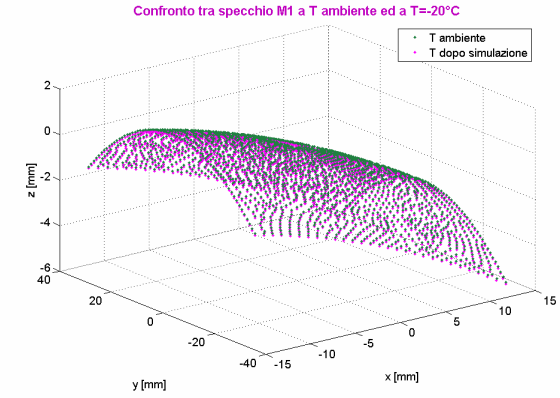


(c)

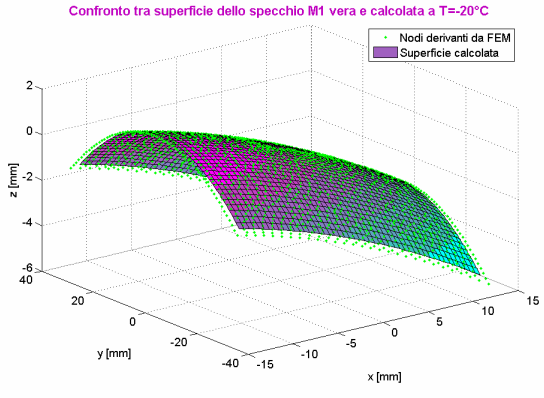


(d)

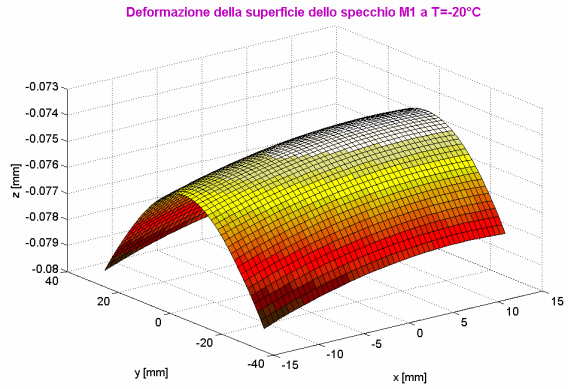
Figura V.9 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dietro della seconda lente con vincoli cinematici: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



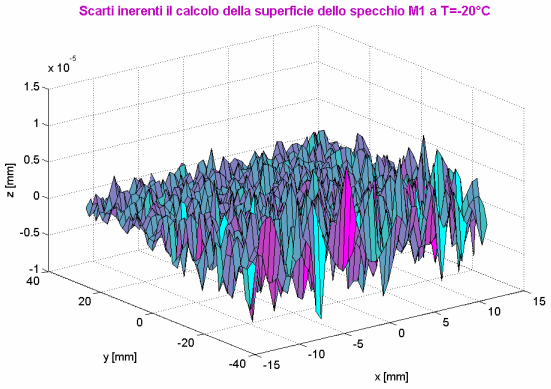
(a)



(b)

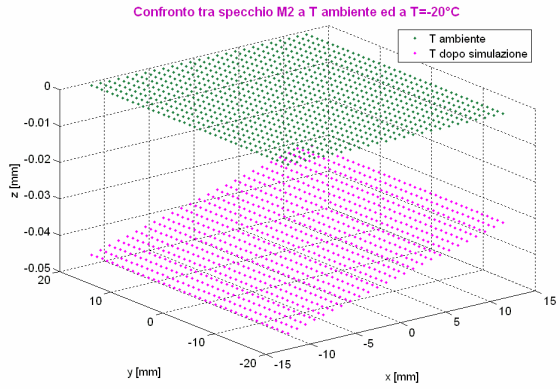


(c)

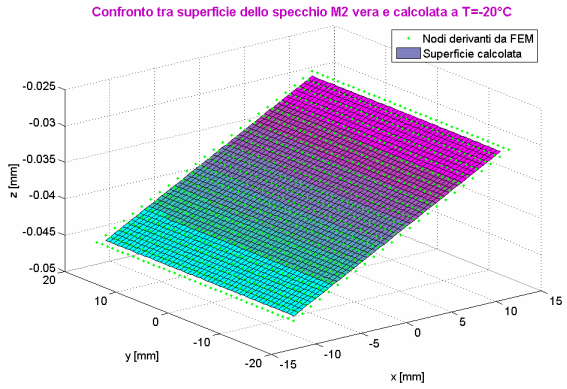


(d)

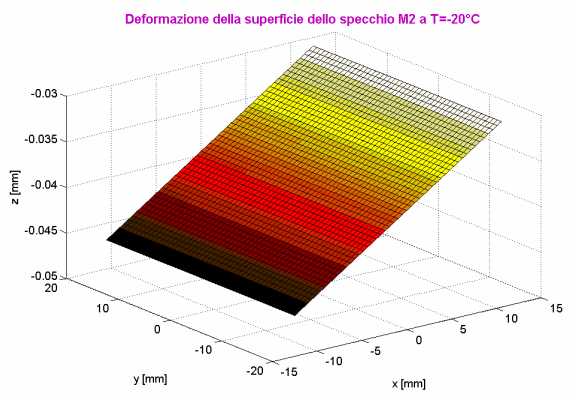
Figura V.10 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dello specchio M1: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un polinomio di grado 20.



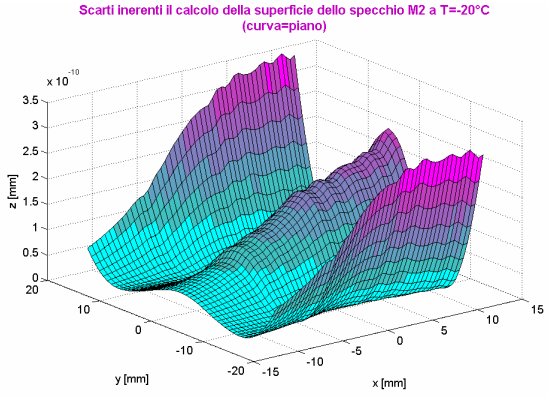
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura V.11 – Risultati derivanti dal calcolo dell'equazione che esprime la superficie dello specchio M1: (a) confronto tra superficie iniziale a T_i=20°C e a T_f=-20°C; (b) confronto tra la superficie finale a T_f=-20°C e la superficie calcolata; (c) deformazione della superficie da T_i=20°C e a T_f=-20°C; (d) scarti inerenti il calcolo della superficie a T_f=-20°C mediante l'equazione di un piano.

Capitolo VI

ANALISI OTTICHE MEDIANTE CODICE RAYTRACE

VI.1 INTRODUZIONE ALLE ANALISI OTTICHE

Il modello della stereocamera è stato studiato ed ottimizzato mediante analisi raytrace in Zemax (il design è visibile nel Cap.III). I risultati delle analisi termo-elastiche, elaborati in Matlab per determinare le equazioni delle superfici degli elementi ottici, sono stati importati in Zemax permettendo di verificare le prestazioni dello strumento.

I cambiamenti di temperatura e la natura dei vincoli opto-meccanici influenzano infatti la dimensione degli spots, le curve MTF, la Diffraction Ensquared Energy e le distorsioni.

Questi parametri sono importanti da determinare in quanto permettono di orientare la decisione su come realizzare la struttura della stereocamera in modo da ottenere un miglior risultato possibile, inoltre permettono di determinare le variazioni dei parametri intrinseci di una telecamera pin-hole equivalente allo strumento.

VI.2 SPOT DIAGRAMS

L'analisi degli Spot Diagrams è molto importante, perché consente di determinare la posizione degli spot sul detector e la loro dimensione.

Relativamente alla stereocamera i canali coinvolti nella ricostruzione tridimensionale della superficie di Mercurio sono due, detti pancromatici. Le loro immagini si trovano in due zone del detector distanziate tra di loro di circa 4mm.

Ogni pixel del detector è quadrato ed ha dimensioni 10x10μm.

Nella figura seguente vengono riportati gli Spot Diagrams della stereocamera quando la temperatura è pari a quella di integrazione, e si considera uno dei due canali pancromatici.

Si può vedere come i raggi di luce stiano dentro un pixel di 10μm, in quanto la scala di misura relativa alla dimensione degli Spot è appunto in micrometri.

Nei paragrafi successivi vengono riportati gli Spot Diagrams considerando diversi vincoli opto-meccanici (vedi Cap.IV).

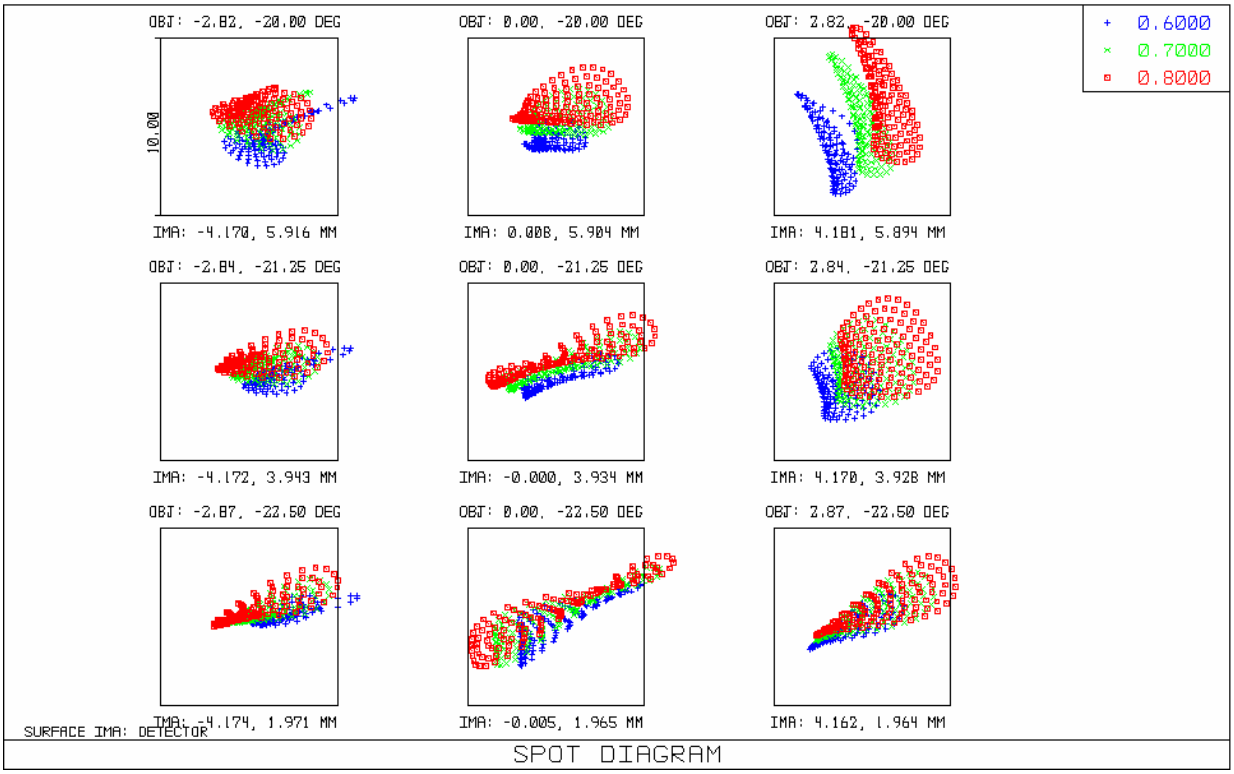


Figura VI.1 – Spot Diagrams della stereocamera a T=20°C, canale pancromatico.

VI.2.1 Spot Diagrams: elementi ottici incollati alla struttura

Le analisi ottiche condotte considerando gli elementi ottici in Fused Silica vincolati alla struttura in alluminio tramite incollaggio hanno portato agli Spot diagrams illustrati di seguito.

In Fig.VI.2 è riportato il caso comprensivo di lenti e prismi incollati e specchi realizzati in lega di alluminio, a T=-20°C.

Per poter isolare i contributi dei singoli componenti in modo da individuare il più critico in Fig.VI.3 sono riportati gli Spot Diagrams relativi ai soli prismi incollati a T=-20°C; in Fig.VI.4 è illustrato il caso in cui le sole lenti sono incollate; in Fig.VI.5 e Fig.VI.6 invece vengono riportati i contributi degli specchi M1 e M2 rispettivamente; in Fig.VII.7 è visibile l'effetto combinato dei due specchi.

È possibile notare come, dal punto di vista della dimensione degli Spot, gli elementi più critici siano rappresentati dai prismi in primis, che causano un ingrandimento di 20 voltesuperiore, dal punto di vista della posizione degli Spot sul detector grande influenza può essere attribuita sia ai prismi che allo specchio M2.

Risulta utile poter determinare un sistema di vincolo di prismi e lenti che sia in grado di influenzare in minor misura la performance dello strumento.

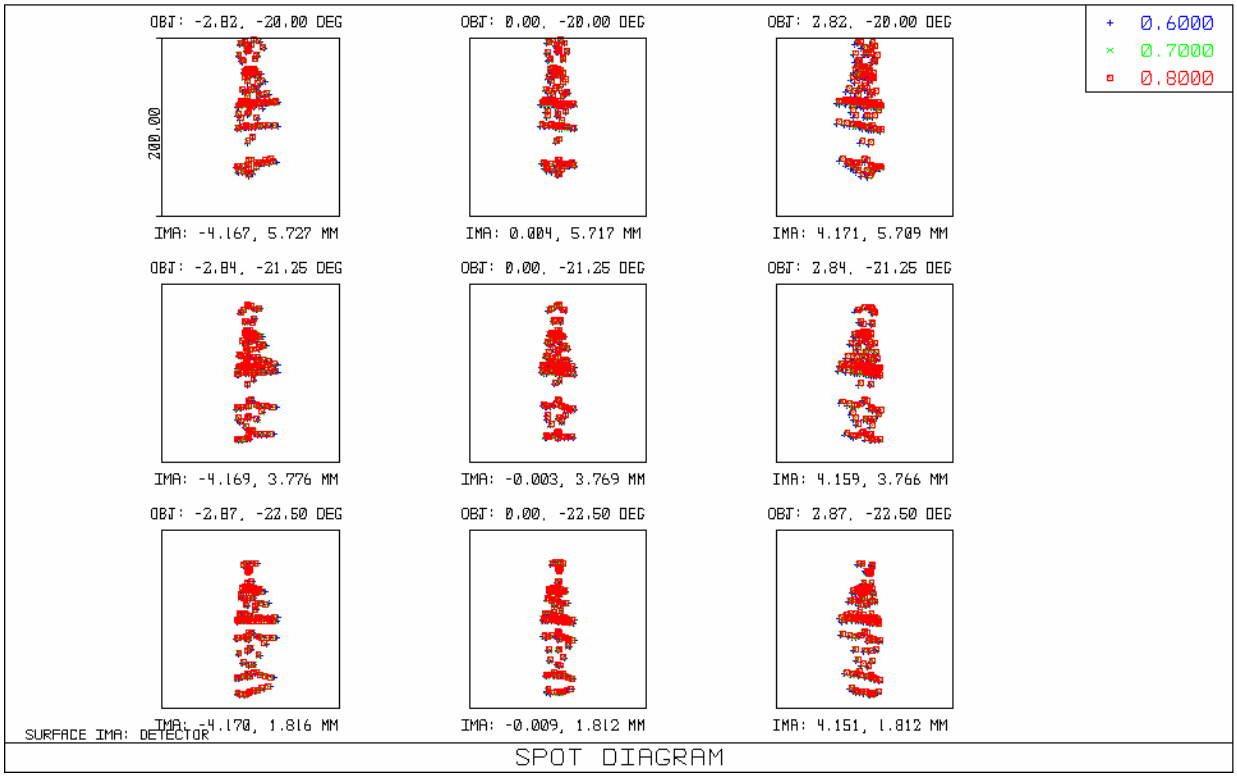


Figura VI.2 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

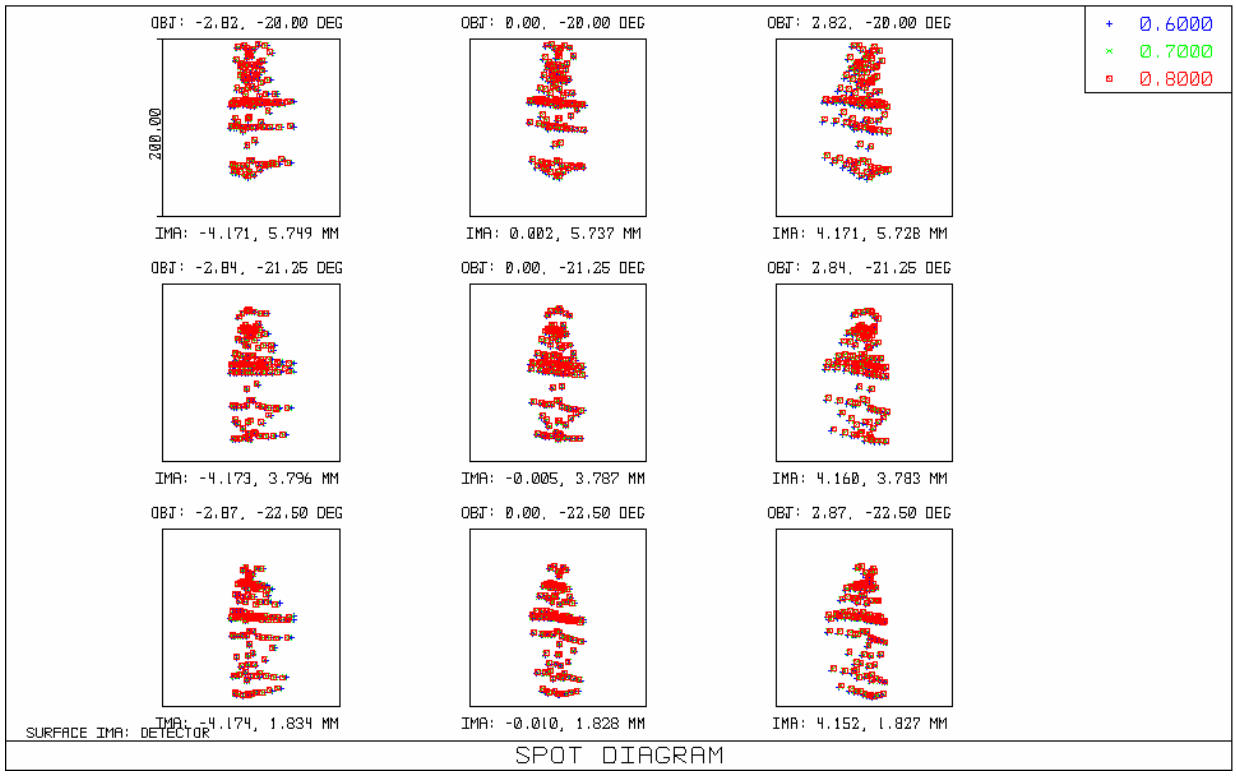


Figura VI.3 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

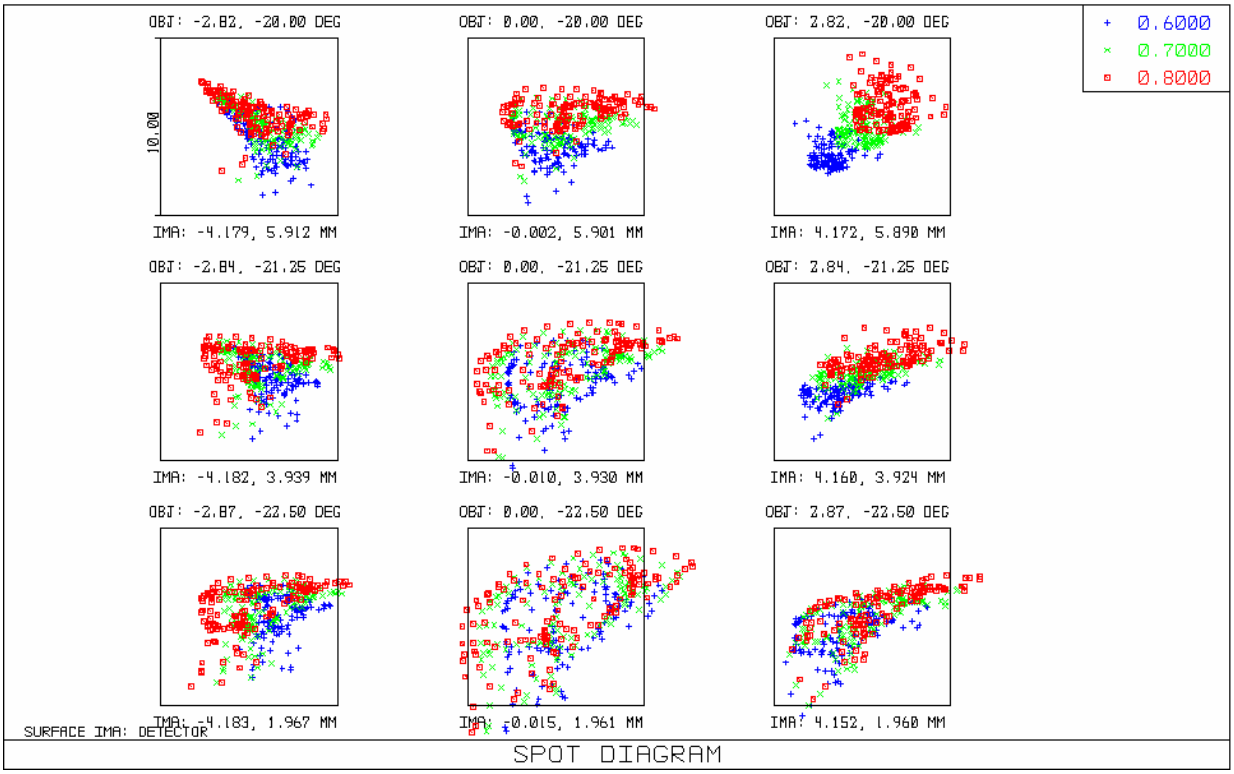


Figura VI.4 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di sole lenti vincolate tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

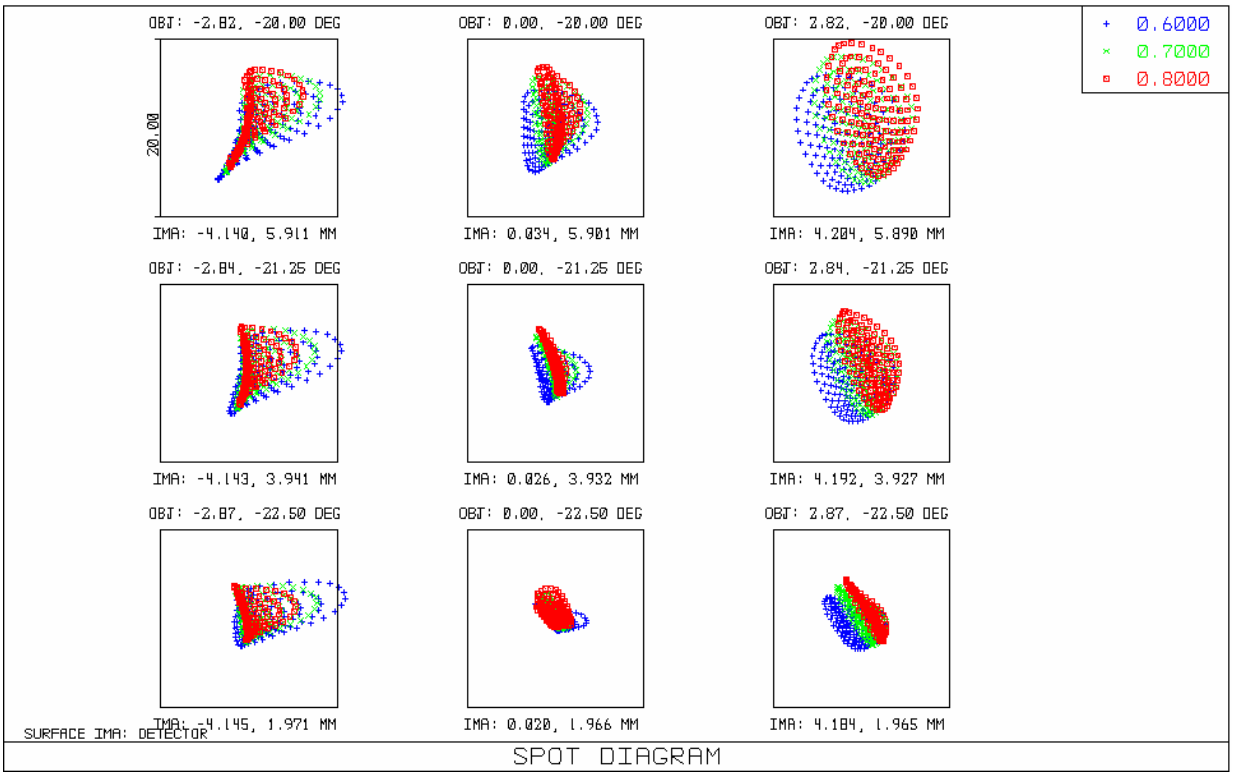


Figura VI.5 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

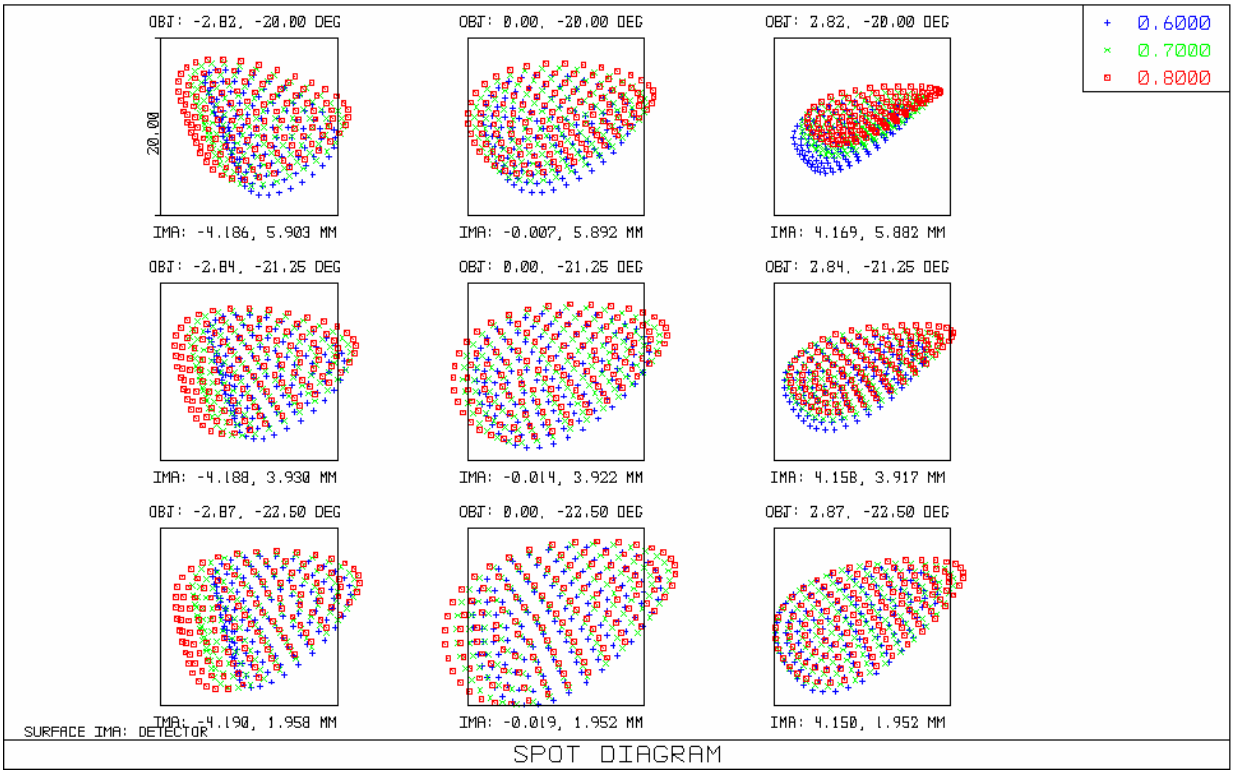


Figura VI.6 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

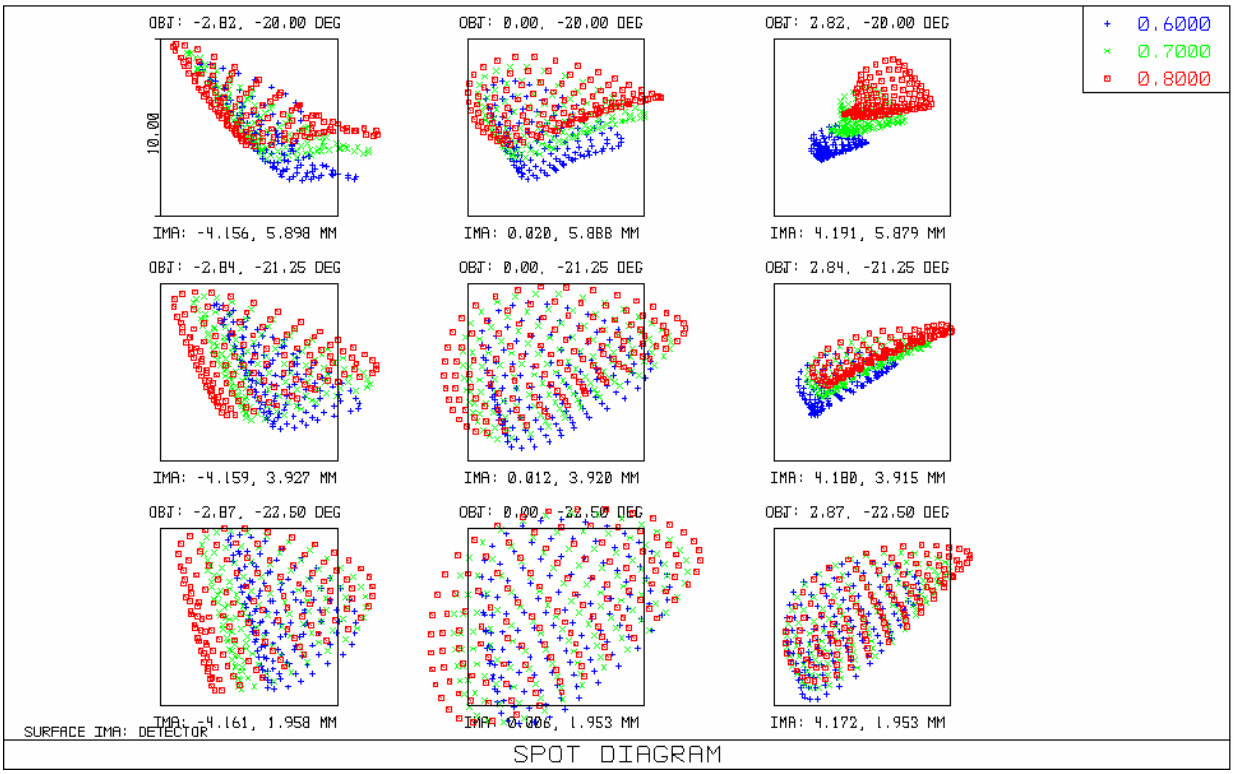


Figura VI.7 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati tramite incollaggio alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

VI.2.2 Spot Diagrams: vincoli cinematici

Le analisi ottiche riportate nel Par.VI.2.1 sono state ripetute considerando dei vincoli cinematici per gli elementi ottici in Fused Silica dello strumento.

Rispetto all'utilizzo di vincoli precedenti, questi provocano a parità di condizione un minore spostamento delle immagini sul piano del Detector, come si può vedere dagli Spot Diagrams: in Fig.VI.1, dove è stato riportato il caso senza deformazioni termiche a temperatura di integrazione per uno dei due canali pancromatici, si nota la posizione dello spot centrale P=(0,000mm;3,934mm), in Fig.VI.2 è riportato il caso in cui sia le lenti che i prismi siano vincolati tramite incollaggio, e le coordinate dello spot centrale diventano P=(-0,003mm;3,769mm) provocando una traslazione di Δ_P=(-0,3px;16,5px) dannosa (come si vedrà nel Cap.VII) per la determinazione della profondità della superficie di Mercurio.

La scelta di utilizzare vincoli cinematici permette di ridurre parecchio la traslazione dello spot centrale che, in analoghe condizioni, come si può vedere nella figura seguente si porterebbe alle coordinate P=(-0,042mm;3,922mm), causando una traslazione di Δ_P=(-4,2px;1,2px).

Si può notare come il contributo peggiore da questo punto di vista sia causato dai prismi.

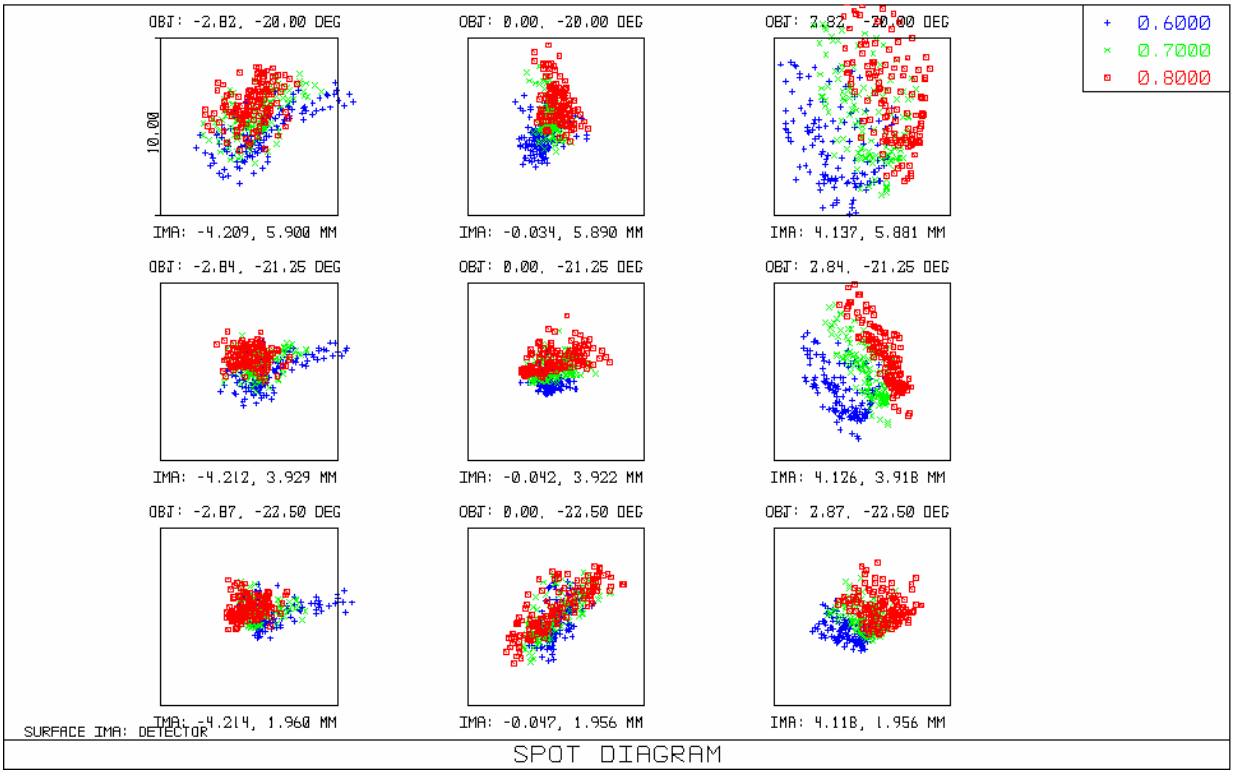


Figura VI.8 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di lenti e prismi vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

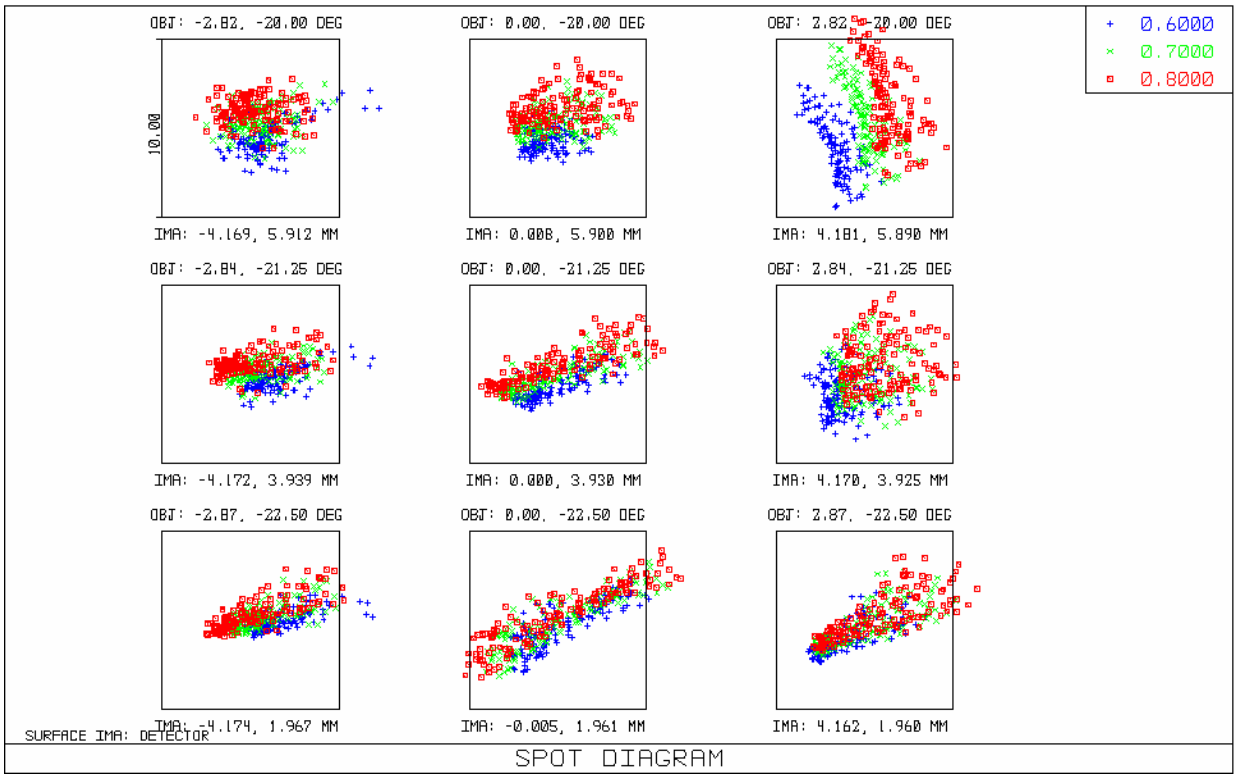


Figura VI.9 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di soli prismi vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

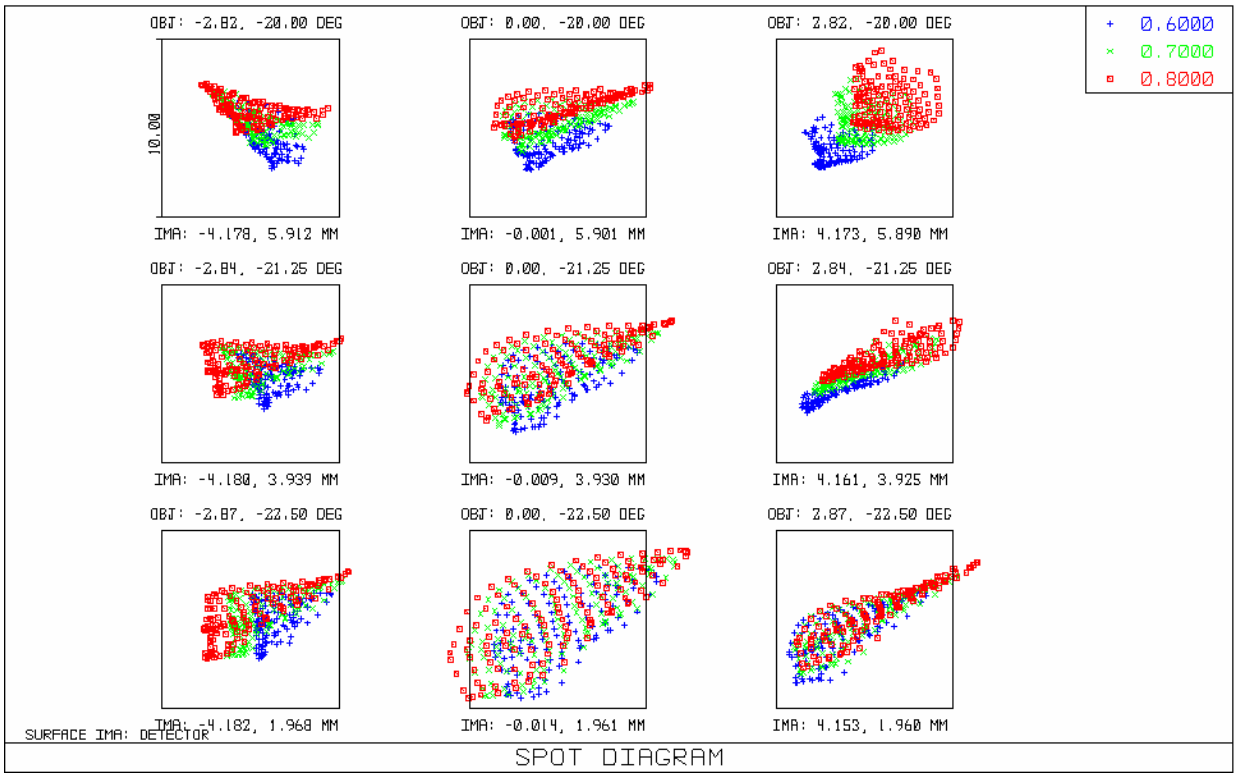
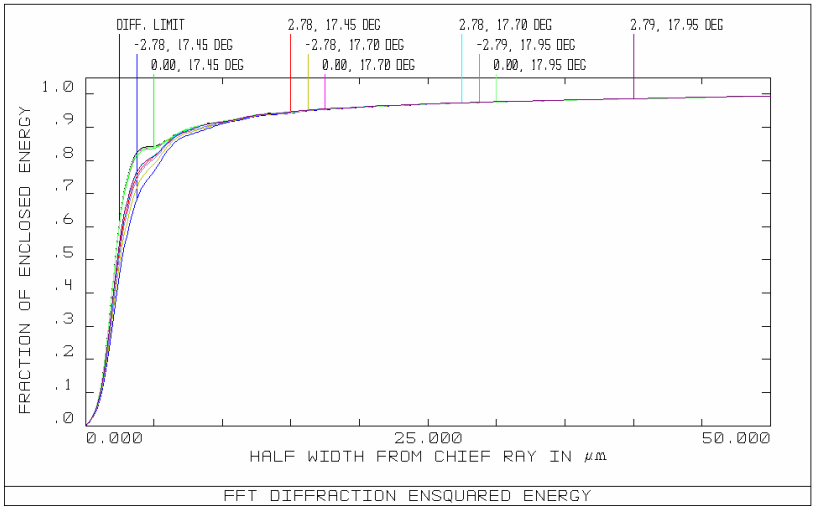


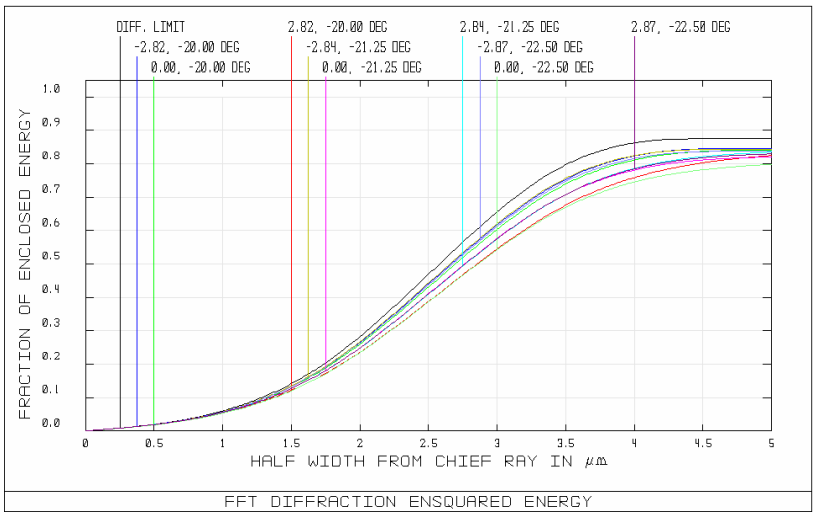
Figura VI.10 – Spot Diagrams della stereocamera a T=-20°C, nel caso di sole lenti vincolati cinematicamente alla struttura della stereocamera, canale pancromatico.

VI.3 DIFFRACTION ENSQUARE ENERGY

La Diffraction Ensquare Energy (EE) è stata calcolata utilizzando Zemax. A temperatura di integrazione la stereocamera è caratterizzata da EE_{min} = 79,83%.



(a)

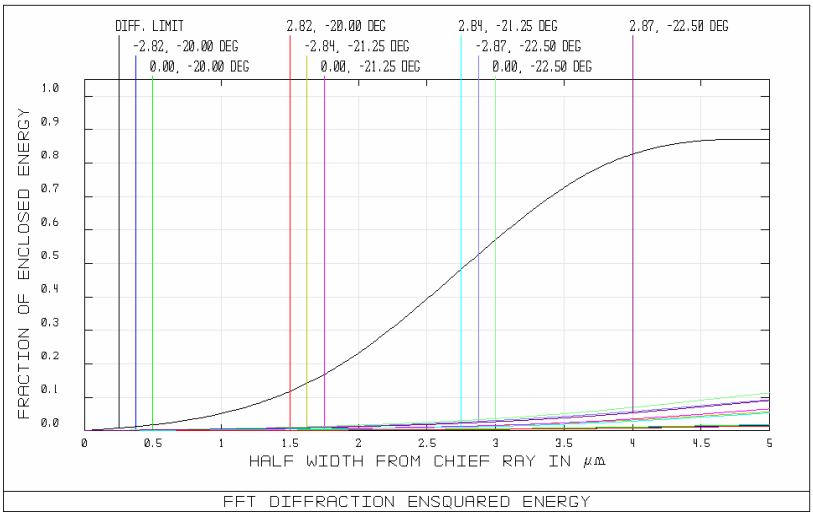


(b)

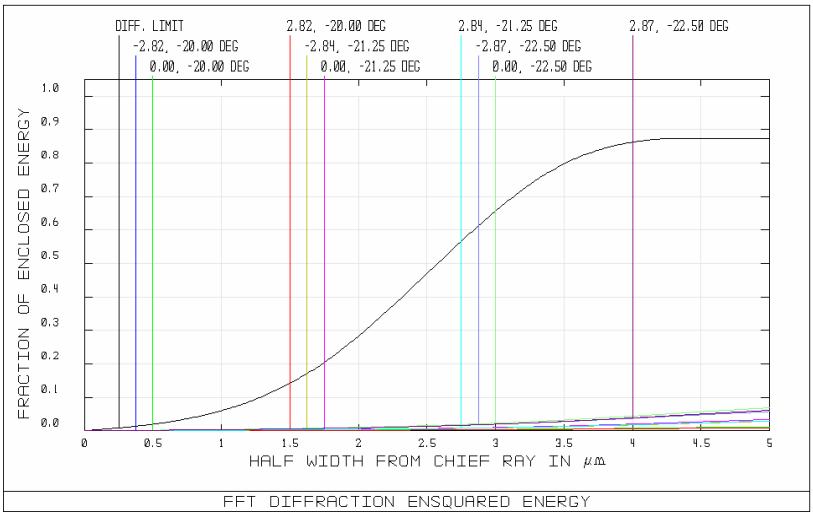
Figura VI.11 – Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=20°C e canale pancromatico: (a) s_{max}=50µm; (b) s_{max}=5µm.

VI.3.1 Diffraction Ensquare Energy: elementi ottici incollati alla struttura

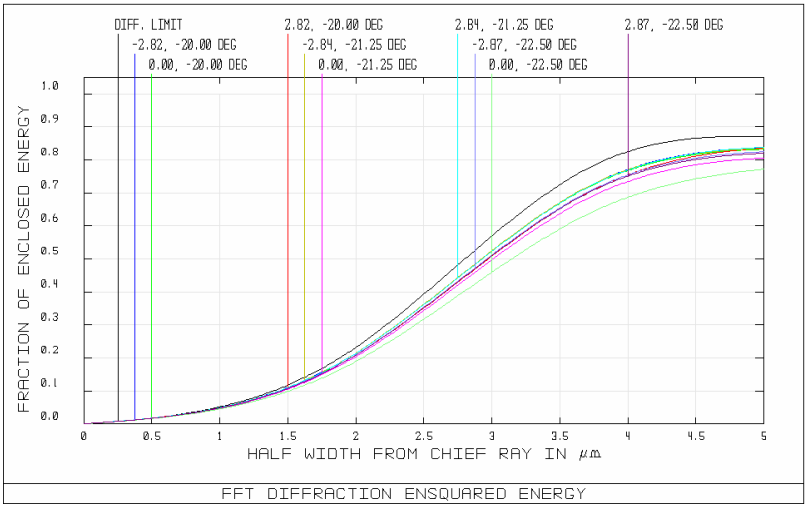
A T=-20°C essa diminuisce fino a EE_{min} = 1,41% nel caso di vincoli rigidi e considerando i contributi di tutti gli elementi ottici (vedi Fig.VI.12).



(a)

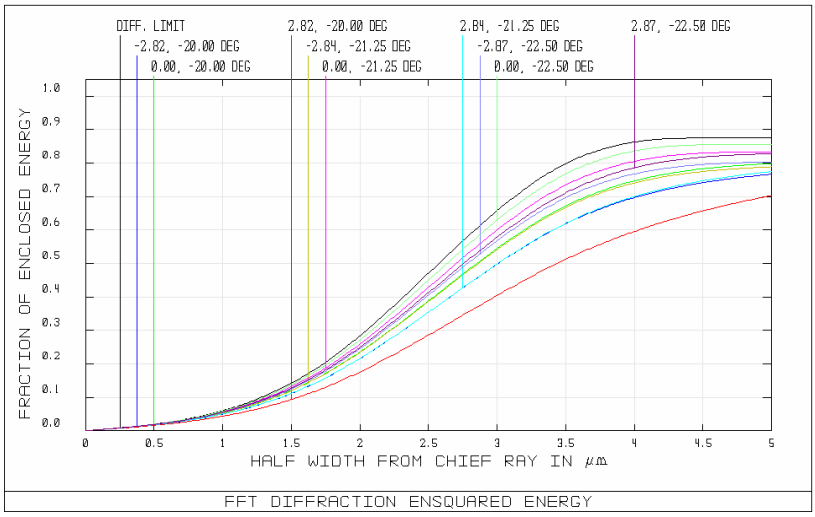


(b)

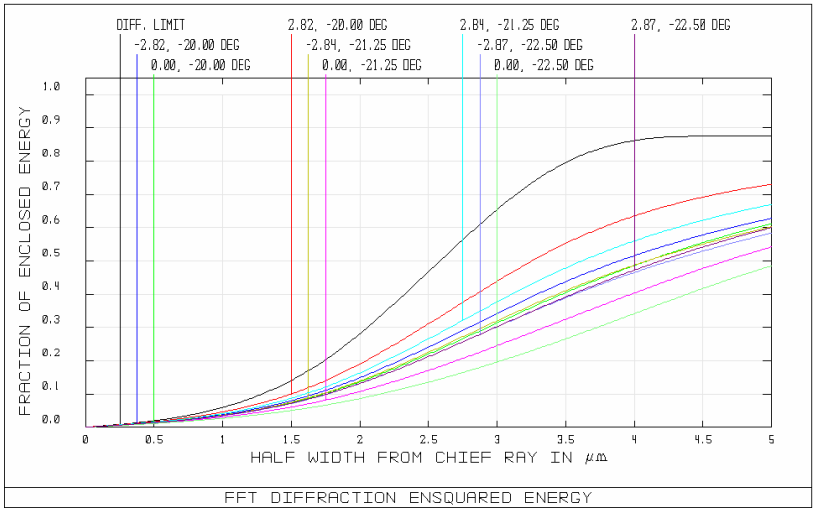


(c)

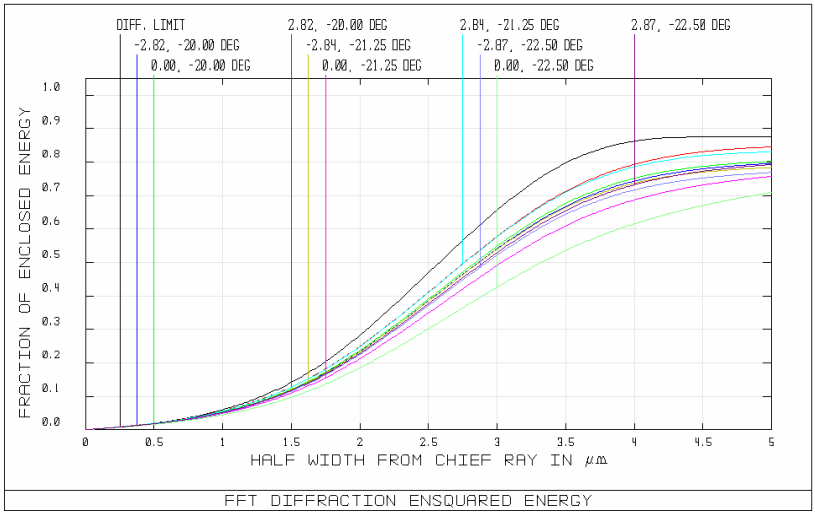
Figura VI.12 – Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico s_{max}=5μm: (a) effetto di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio; (b) effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio; (c) effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio.



(a)



(b)

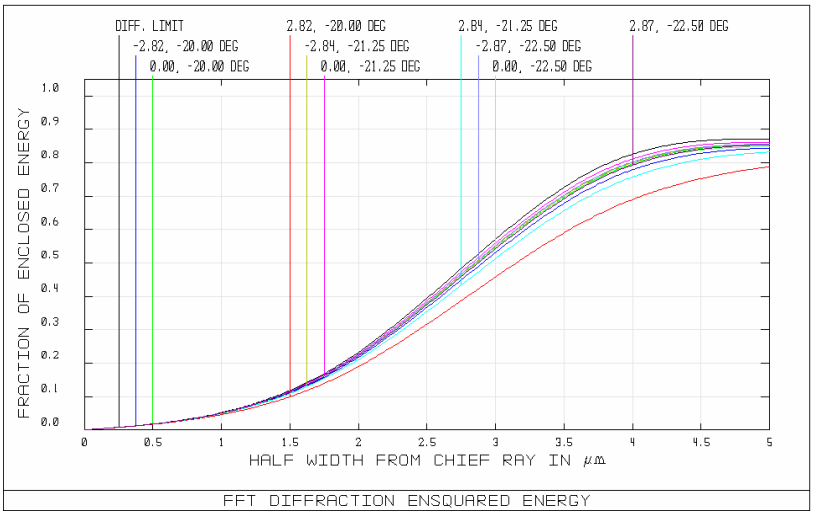


(c)

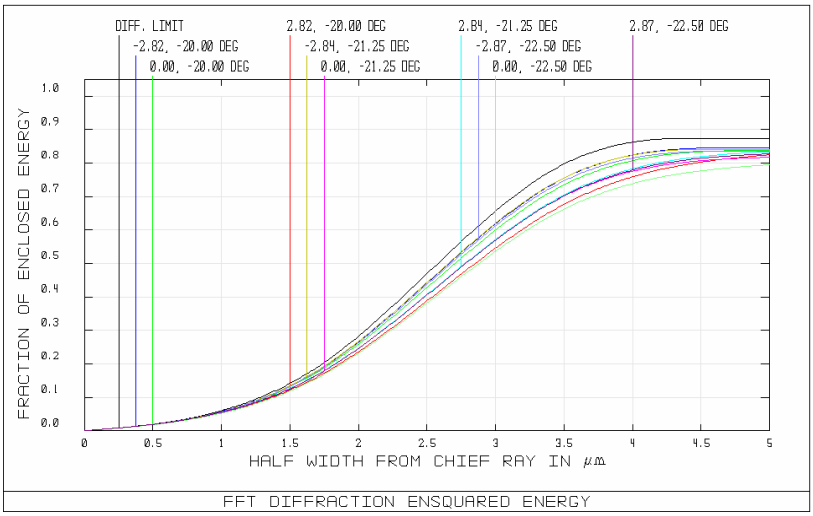
Figura VI.13 – Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico s_{max}=5µm: (a) effetto dello specchio M1; (b) effetto dello specchio M2; (c) effetto di entrambi gli specchi M1 e M2.

VI.3.2 Diffraction Ensquare Energy: vincoli cinematici

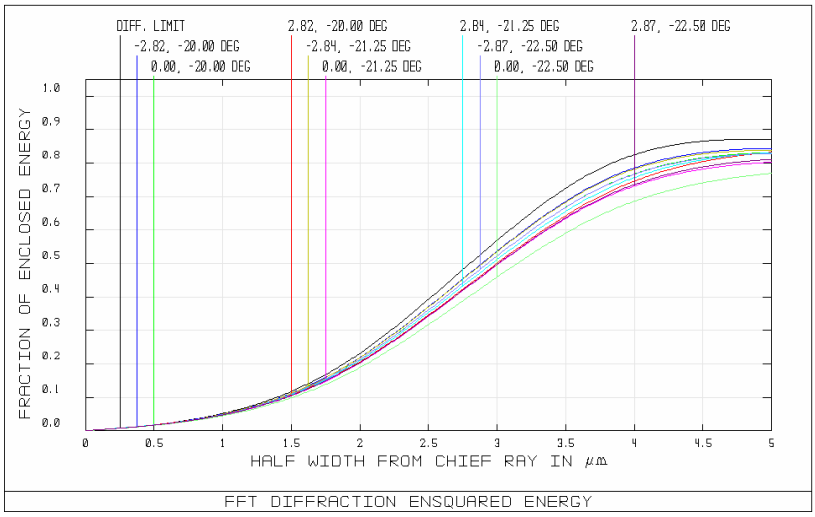
L'utilizzo di vincoli cinematici permette una minor riduzione della Diffraction Esquare Energy, con un valore minimo EE_{min} = 78,80%. Ancora una volta il contributo peggiore è quello dovuto ai prismi vincolati alla struttura della stereocamera tramite incollaggio.



(a)



(b)

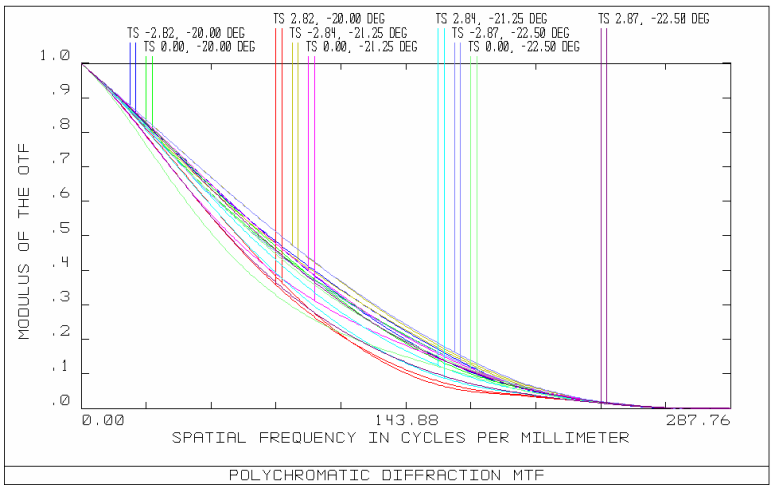


(c)

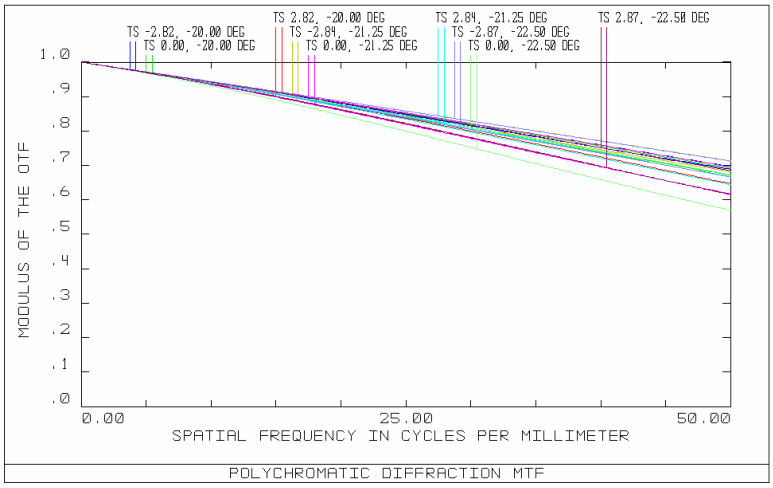
Figura VI.14 – Diffraction Ensquare Energy della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico s_{max}=5µm: (a) effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente; (b) effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente; (c) effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente.

VI.4 CURVE MTF

Di seguito vengono riportate le curve MTF iniziale della stereocamera a temperatura di integrazione, nei casi di vincoli incollati o cinematici (Par.VII.4.1 e Par.VII.4.2 rispettivamente), isolando come nel paragrafo precedente i contributi degli elementi ottici.



(a)

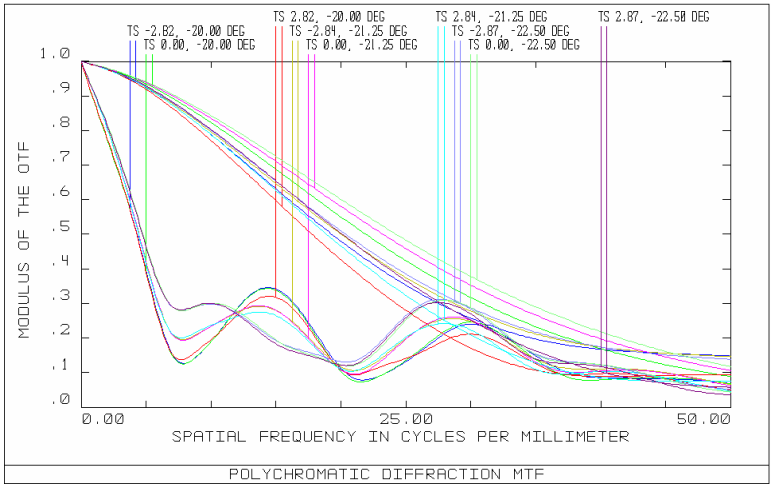


(b)

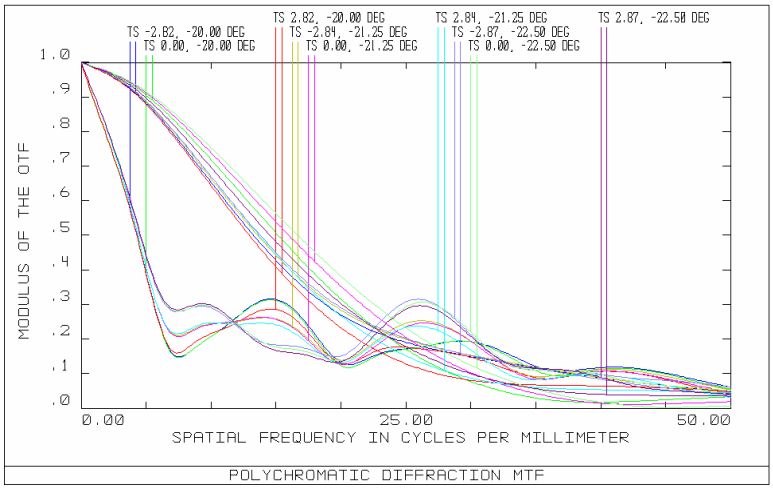
Figura VI.11 – Curve MTF della stereocamera a T=20°C e canale pancromatico: (a) f_{max}=287,76Hz; (b) f_{max}=50Hz.

VI.4.1 Curve MTF: elementi ottici incollati alla struttura

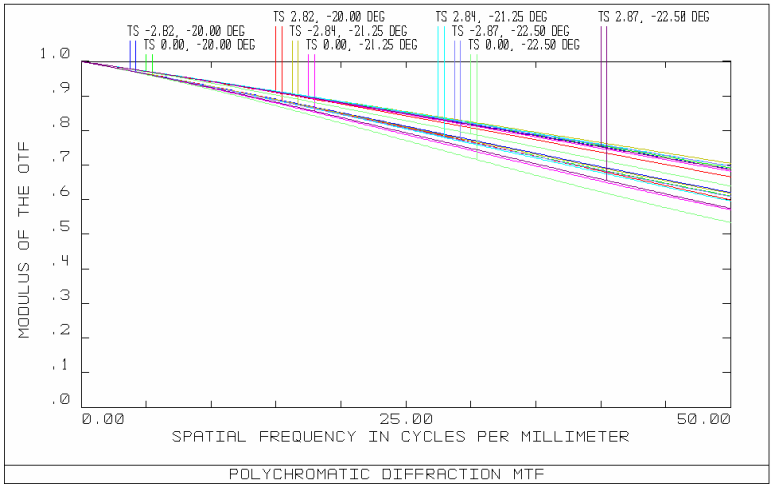
L'utilizzo di vincoli rigidi provoca un visibile peggioramento delle curve MTF: dalla figura seguente si può notare come il contributo peggiore sia quello dei prismi. Se a temperatura di integrazione lo strumento garantisce un valore di MTF_{min} pari a alla frequenza di 50Hz, a T=-20°C si ha MTF_{min}=0,0060 a causa dei soli prismi, MTF_{min}=0,5339 a causa delle sole lenti e complessivamente MTF_{min}=0,0557 considerando l'effetto di tutti gli elementi ottici.



(a)

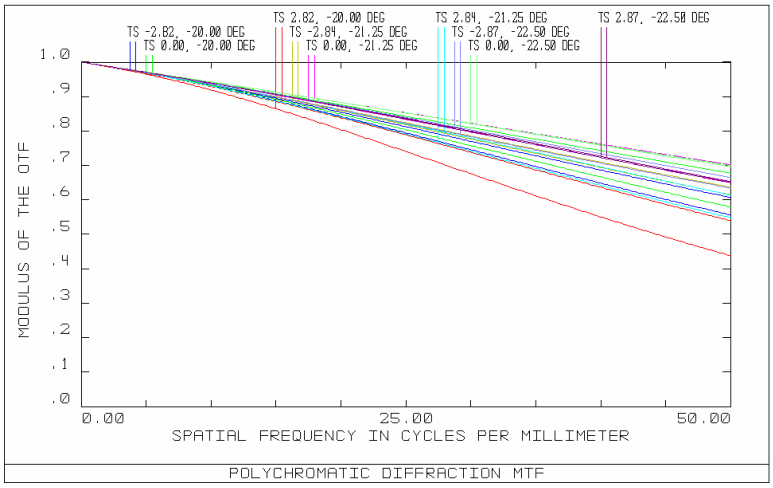


(b)

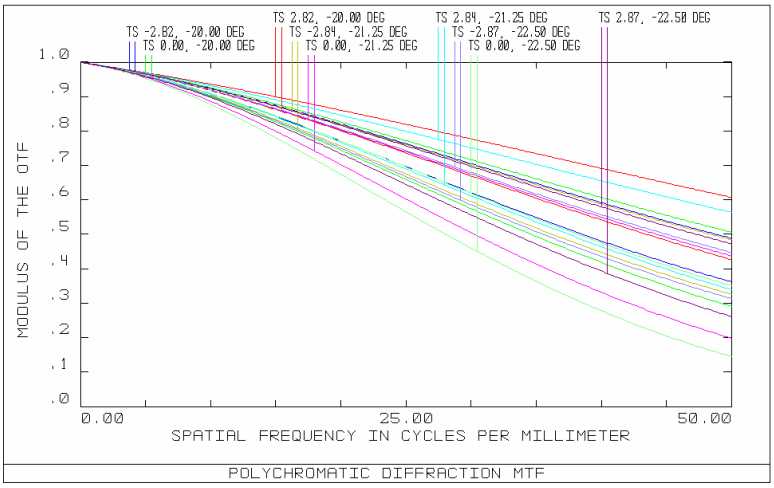


(c)

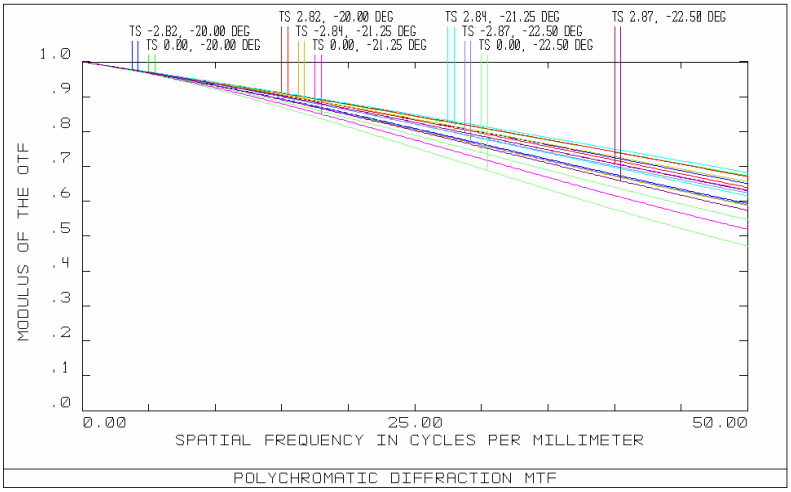
Figura VI.12 – Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico f_{max}=50Hz: (a) effetto di lenti e prismi vincolati tramite incollaggio; (b) effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio; (c) effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio.



(a)



(b)



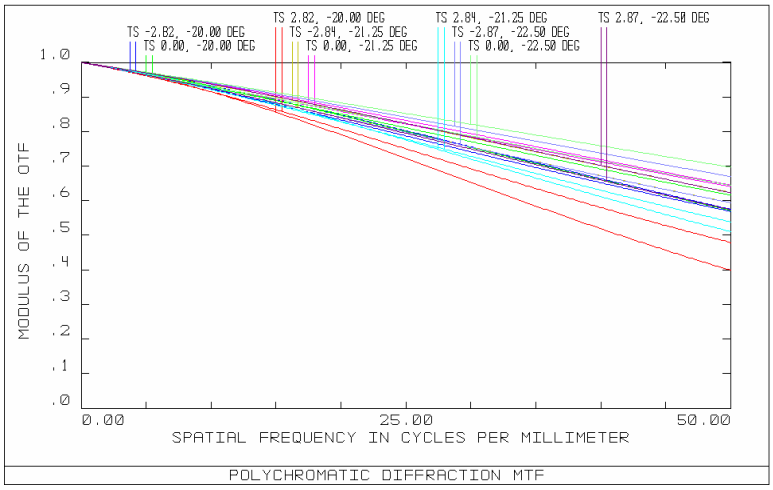
(c)

Figura VI.13 – Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico f_{max}=50Hz: (a) effetto dello specchio M1; (b) effetto dello specchio M2; (c) effetto di entrambi gli specchi M1 e M2.

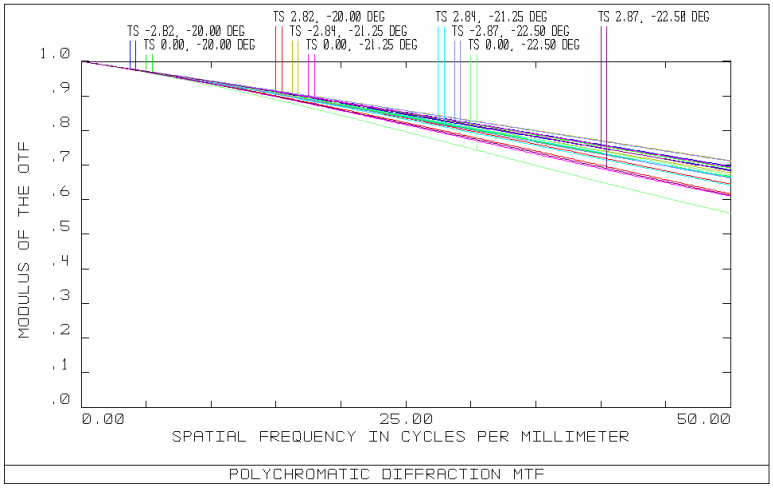
VI.4.2 Curve MTF: vincoli cinematici

L'utilizzo di vincoli cinematica permette di ottenere a T=-20°C un valore di MTF più elevato rispetto a quello risultante dall'utilizzo di vincoli incollati.

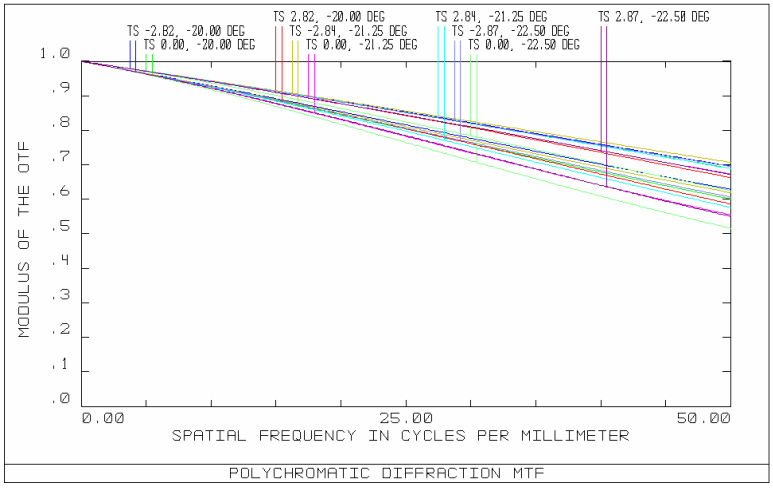
L'effetto dei prismi migliora sensibilmente, come si può vedere in Fig.VI.14.b. In generale il valore di MTF minimo che si misura in questo caso, considerando il contributo di lenti e prismi vincolati cinematicamente e degli specchi è MTF_{min}=0,6596.



(a)



(b)



(c)

Figura VI.14 – Curve MTF della stereocamera a T=-20°C e canale pancromatico f_{max}=50Hz: (a) effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente; (b) effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente; (c) effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente.

VI.5 DISTORSIONI

In ultima analisi sono state valutate le distorsioni risultanti sulle immagini filtrate pancromaticamente. A temperatura di integrazione la stereocamera presenta delle distorsioni pari ad un valore massimo 12,3μm.

A T=-20°C l'entità delle distorsioni dipende dal sistema di vincolo scelto per le ottiche, considerando i vincoli cinematica si ottiene una distorsione massima pari a 11,4μm mentre utilizzando vincoli incollati si ottiene 7,7μm.

Questo è l'unico caso in cui i vincoli cinematica non determinano una prestazione migliore.

Le distorsioni delle immagini non sono però simmetriche rispetto ai loro assi, come si può vedere in Fig.VI.15, questo fattore comporta un incremento dell'incertezza relativa alla profondità di Mercurio come si vedrà nel capitolo seguente.

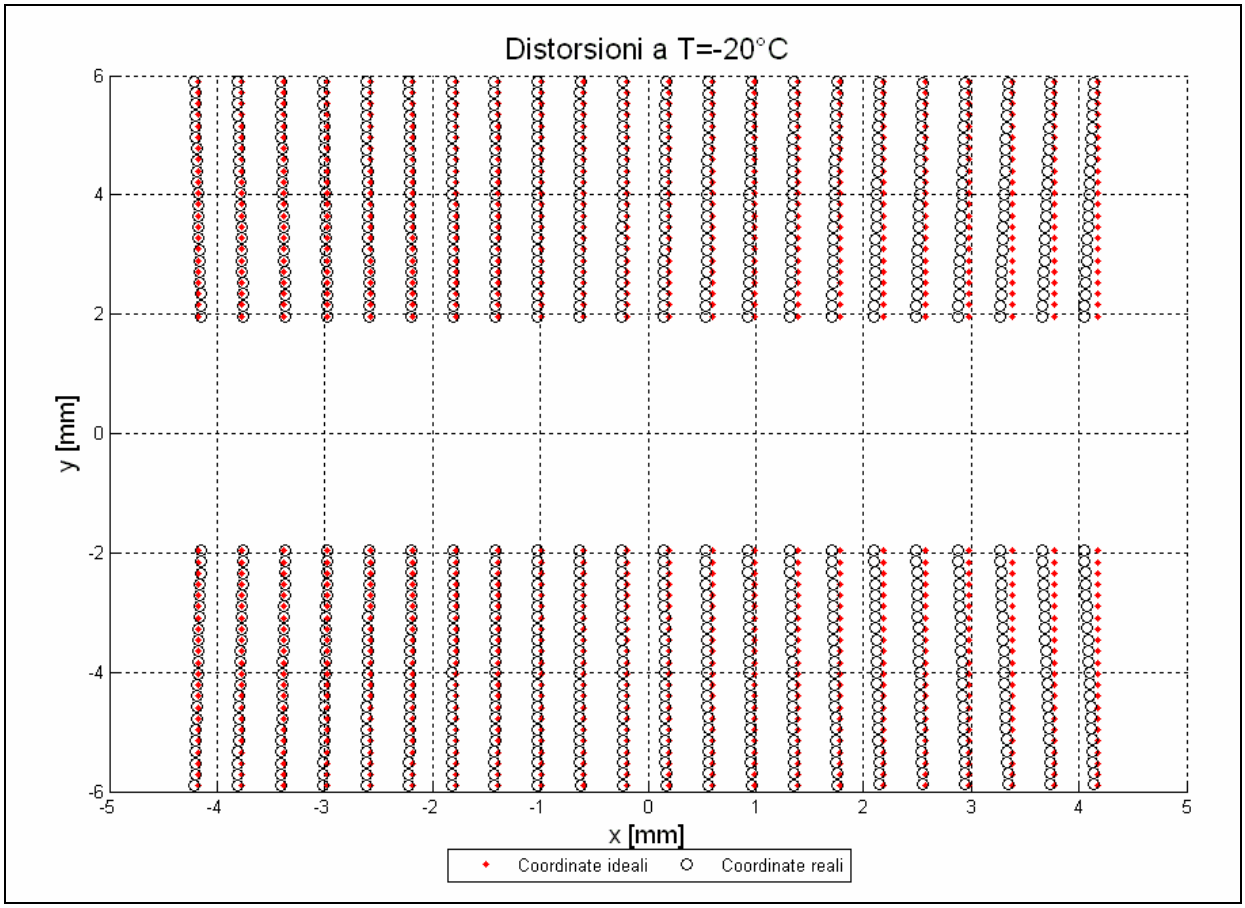


Figura VI.15 – Esempio di distorsioni prodotte sulle immagini a T=-20°C e canale pancromatico effetto di lenti e prismi vincolati cinematicamente.

VI.6 CONSIDERAZIONI FINALI

Osservando i risultati precedentemente riportati si può notare come l'utilizzo di vincoli cinematici applicati alle lenti ed ai prismi in Fused Silica migliori sensibilmente la performance della stereocamera, in termini di Spot Diagrams, Diffraction Ensquare Energy e curve MTF.

Nel caso di vincoli cinematica le variazioni dei parametri ottici appena elencati risultanto inferiori rispetto all'utilizzo di un semplice vincolo di incollaggio su lenti e prismi.

Capitolo VII

VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA RELATIVA ALLA PROFONDITÀ DELLA SUPERFICIE DI MERCURIO

VII.1 MODELLO PIN-HOLE DELLA TELECAMERA E VARIAZIONE DEI PARAMETRI INTRINSECI

La stereocamera che verrà utilizzata nella missione BepiColombo può essere pensata come una coppia di telecamere pin-hole che fotografano la superficie di Mercurio con inclinazioni rispetto alla direzione di Nadir di +20° e -20°.

Con le analisi ottiche che sono state effettuate in Zemax si possono determinare i parametri intrinseci di queste telecamere e, più precisamente, la loro focale, le posizioni dei loro centri ottici e degli spots centrale delle immagini e le loro distorsioni. Questi elementi influenzano la determinazione della profondità della superficie visionata, per cui un loro eventuale cambiamento causato dalle condizioni operative dello strumento a bordo della sonda può incrementare l'incertezza con la quale viene effettuata la ricostruzione della superficie di Mercurio.

VII.2 VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA SULLA PROFONDITÀ DELLA SUPERFICIE

Le variazioni dei parametri intrinseci della stereocamera precedentemente analizzata sono stati utilizzati per determinare l'entità dell'incertezza nella profondità ricostruita con metodo stereoscopico applicato a due canali di immagine. Essa è stata determinata in due modi tra di loro confrontabili, e più precisamente mediante la metodologia GUM e tramite simulazioni con codice Montecarlo effettuate tramite Matlab:

- **Metodo GUM:** Guide to the expression of uncertainty in measurement. Vengono utilizzati i coefficienti di sensibilità ricavabili mediante linearizzazione del modello; questa metodologia

assume che ad ogni fonte di incertezza considerata sia associata una corrispondente incertezza standard ricavata da una distribuzione di probabilità assunta o determinata sperimentalmente.

- **Metodo di Monte Carlo:** si assume che ad ogni fonte di incertezza considerata sia associata una corrispondente PDF ricavata sperimentalmente o assunta.

In generale per entrambe i metodi di rappresentazione e propagazione dell'incertezza si susseguono le seguenti fasi:

- Identificazione delle fonti di incertezza il cui contributo risulta non trascurabile ai fini del calcolo dell'incertezza dovuta a distorsioni, spostamento degli spots, variazione della focale;
- attribuzione dell'incertezza in accordo con la rappresentazione (incertezza standard, PDF);
- propagazione delle incertezze del punto precedente in accordo con il metodo scelto.

VII.2.1 Metodo GUM

La *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) è il documento di riferimento accettato a livello internazionale per la valutazione dell'incertezza. Un concetto basilare espresso della GUM è l'utilizzo di una distribuzione di probabilità come mezzo ottimale per esprimere l'informazione disponibile sui possibili valori di una grandezza.

Inoltre, la GUM propone una procedura per il calcolo dell'incertezza da associare ad un'uscita generica Y ottenibile da una funzione di n variabili X_1,..., X_n, che è stata utilizzata nel presente lavoro ed è schematicamente descritta nel seguito.

In questo paragrafo e nei successivi, quando verrà fatto riferimento ad un generico legame funzionale f tra grandezze in ingresso ed una grandezza in uscita, verranno indicate con lettere maiuscole (Y, X_1,..., X_n) le varie grandezze, con lettere minuscole (y=E(Y), x_1=E(X_1),..., x_n=E(X_n)) i valori attesi, con lettere greche (η per Y , ξ_i per X_i) i valori possibili. Il legame funzionale generico tra gli ingressi X_1,..., X_n e l'uscita Y può essere espresso da:

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_n) \tag{7.1}$$

Per il calcolo del valore atteso y della relativa incertezza standard la GUM considera funzioni *f* lineari o linearizzate mediante espansione in serie di Taylor del I° ordine:

$$f(X_1,...,X_n) = \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot X_i \tag{7.2}$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i}(x_1,...,x_n) \tag{7.3}$$

in cui i termini c_i sono i coefficienti di sensibilità, ricavabili come derivate parziali della *f* rispetto alle variabili in ingresso. Con questa ipotesi è possibile trovare il valore atteso e le incertezze standard cercate nel seguente modo:

$$y = f(x_1,...,x_n) \tag{7.4}$$

$$u^2(y) = \{c_i\}^T [U_x] \{c_i\} \tag{7.5}$$

nelle quali $\{c_i\} = (c_1,...,c_n)$ e $[U_x]$ è la matrice di covarianza degli ingressi $X_1,..., X_n$.

Dopo aver calcolato l'incertezza standard, per esprimere l'incertezza mediante un intervallo di confidenza, associato ad una probabilità di copertura desiderata (o livello di confidenza), è necessario introdurre un'iotesi aggiuntiva sulla distribuzione di probabilità dell'uscita Y. Infatti, secondo l'approcio sopra esposto, non è stata calcolata né la distribuzione di probabilità PDF, né la distribuzione cumulata di Y, dalle quali sarebbe possibile ricavare l'intervallo di confidenza associato alla probabilità di copertura desiderata.

Basandosi sul teorema del Limite Centrale, viene assunta per Y una distribuzione di tipo gaussiano con deviazione standard σ pari all'incertezza u(y) sopra calcolata. Dopo aver scelto un livello di confidenza pari a 0,997, è possibile trovare l'intervallo di confidenza cercato con un fattore di copertura 3: [y-3u(y), y+3u(y)].

Con questo metodo è stata valutata l'incertezza sulla profondità della superficie osservata, ricavata mediante la triangolazione delle immagini risultanti dai due canali pancromatici della stereocamera posti con un'inclinazione di ±20° (Par.III.2). Si è considerata una distanza di 400km da Mercurio ed una superficie di punti valutati indipendentemente l'uno dall'altro.

Non potendo vantare una conoscenza di tipo campionario delle grandezze in gioco, si adottano incertezze di tipo B utilizzando i valori calcolati dalle analisi ottiche eseguite in Zemax.

L'incertezza tipo composta si determina linearizzando il modello (7.1) nell'intorno dello stato relativamente al quale si desidera avere la stima:

$$i_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{p} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot i_{x_i} \right)^2} \tag{7.6}$$

dove *f* è il modello, x_i sono le grandezze che intervengono (non correlate) in numero *p* ed i_{xi} è l'incertezza tipo di ogni singola grandezza di ingresso.

VII.2.2 Metodo Monte Carlo

La formula (4.2.5) di propagazione dell'incertezza richiede che l'approssimazione introdotta con l'espansione in serie di Taylor della funzione f e l'ipotesi sull'andamento di tipo gaussiano della PDF di Y siano accettabili. L'approccio concettualmente corretto per arrivare ad esprimere un intervallo di confidenza per la grandezza in uscita Y richiede la propagazione delle distribuzioni di probabilità dei singoli ingressi X_i per arrivare alla stima della PDF associata ad Y .

Una volta determinata la PDF di Y è possibile determinare il più piccolo intervallo di confidenza per la probabilità di copertura desiderata (ad es. 0,997). La distribuzione di probabilità dell'uscita Y può essere stimata mediante il metodo di Monte Carlo. Questo metodo generale di simulazione prevede una procedura iterativa che può essere schematizzata come segue:

1. viene stimata sperimentalmente o assunta una distribuzione di probabilità per ogni ingresso X_1, …, X_n;
2. sulla base di quanto trovato nel punto precedente, per ogni PDF viene calcolata la corrispondente distribuzione di probabilità cumulata CDF;
3. mediante un opportuno generatore di numeri pseudo-casuali uniformemente distribuiti nell'intervallo (0-1), vengono generati n numeri ρ_1, ..., ρ_n uno per ogni ingresso di f;
4. vengono calcolati i corrispondenti valori ξ_1, …, ξ_n degli ingressi X1, …, Xn mediante l'inversione delle corrispondenti distribuzioni cumulate CDF;
5. si calcola il corrispondente valore η dell'uscita Y con i valori ξ_1, …, ξ_n appena trovati;
6. le fasi dalla 3 alla 5 vengono ripetute un numero N_{iter} di volte ($N_{iter} \approx 10^4 \div 10^5$), in modo da ricavare N_{iter} valori η di Y;
7. dai valori η di Y viene calcolato l'istogramma delle frequenze, il quale, se opportunamente costruito, rappresenta una stima della distribuzione di probabilità dell'uscita Y;
8. viene calcolato il valore atteso y di Y dalla sua PDF;
9. viene integrata la PDF di Y per trovare la corrispondente distribuzione cumulata CDF;

10. scelto il livello di confidenza (ad es. 0,954) è possibile ricavare il minimo intervallo di confidenza corrispondente dalla CDF di Y.

Seguendo questa procedura è possibile giungere alla determinazione del valore atteso y e dell'intervallo di confidenza associato ad una probabilità di copertura desiderata, senza fare approssimazioni mediante espansione in serie di Taylor e senza ipotizzare preventivamente la forma della distribuzione di probabilità di Y.

L'incertezza caratterizzante la profondità della superficie osservata di Mercurio è stata valutata anche con questo metodo, considerando un intervallo di confidenza di 3σ (99,7% dei casi).

VII.2.3 Risultati

Dalle valutazioni delle incertezze secondo le metodologie GUM e Monte Carlo sono risultati dei grafici che sintetizzano il confronto tra i due metodi, come si può vedere nelle seguenti figure.

In Fig.VII.1 è riportata l'incertezza relativa alla stereocamera a temperatura di integrazione (T=20°C): i contributi all'incertezza dovuti a variazione di focale, centro ottico e spostamento delle immagini sul detector sono nulli, l'unica grandezza che è presente con valori positivi è la distorsione. Si può dedurre quindi che a temperatura di integrazione la sola incertezza presente nel modello della stereocamera è quella relativa alle distorsioni.

Nelle Fig.VII.2, Fig.VII.3 e Fig.VII.4 sono riportati rispettivamente tutti i contributi degli elementi ottici incollati, dei soli prismi incollati e delle sole lenti incollate a T=-20°C: ancora una volta si vede come il contributo più consistente all'aumentare dell'incertezza sia quello dovuto ai prismi.

Nelle Fig.VII.5, Fig.VII.6 sono rappresentate le incertezze dovuti ai due specchi a T=-20°C, dei quali il peggiore è quello piano (M2). Infine, nelle Fig.VII.7, Fig.VII.8 e Fig.VII.9 sono riportati rispettivamente tutti i contributi degli elementi ottici in Fused Silica vincolati cinematicamente, dei soli prismi vincolati cinematicamente e delle sole lenti vincolate cinematicamente a T=-20°C: l'incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio è sensibilmente diminuita, soprattutto quella relativa al contributo dei prismi. Nella Tab.VII.1 sono riassunti i risultati nel caso più gravoso di variazione di temperatura da T_i=20°C a T_f=-20°C: vengono riportati i valori massimi delle incertezze illustrate nelle figure valutate mediante la metodologia GUM, In Tab. VII.2 sono sintetizzati i casi comprensivi di tutte le ottiche deformate sia a T=-20°C che a T=30°C, sempre mediante la derivazione dell'incertezza GUM.

In Fig.VII.10 sono illustrate le incertezze valutate mediante la GUM comprensive di tutti gli elementi ottici analizzati vincolati sia cinematicamente che tramite incollaggio, a temperatura di integrazione, a T=-20°C e a T=30°C.

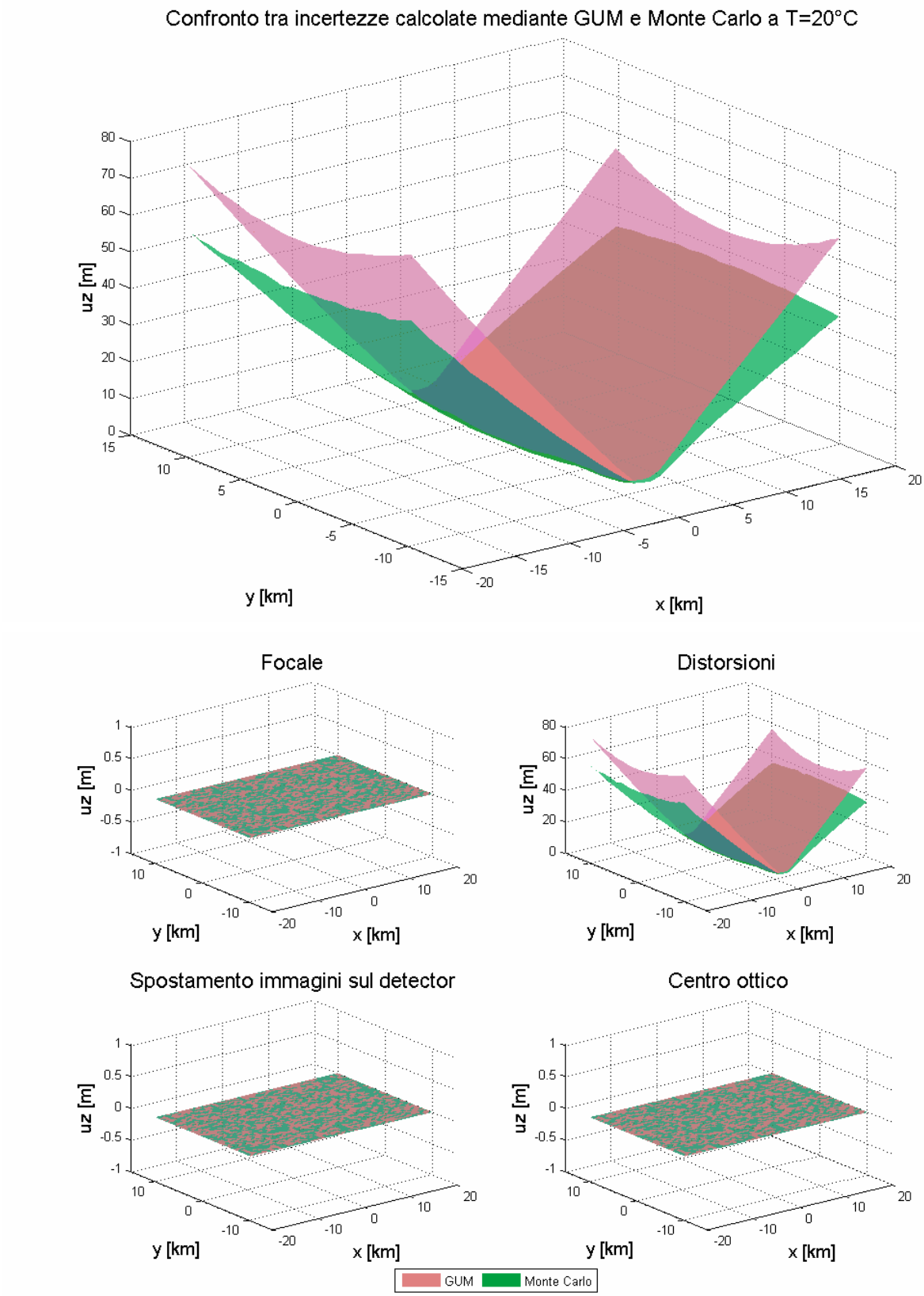


Figura VII.1 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=20°C.

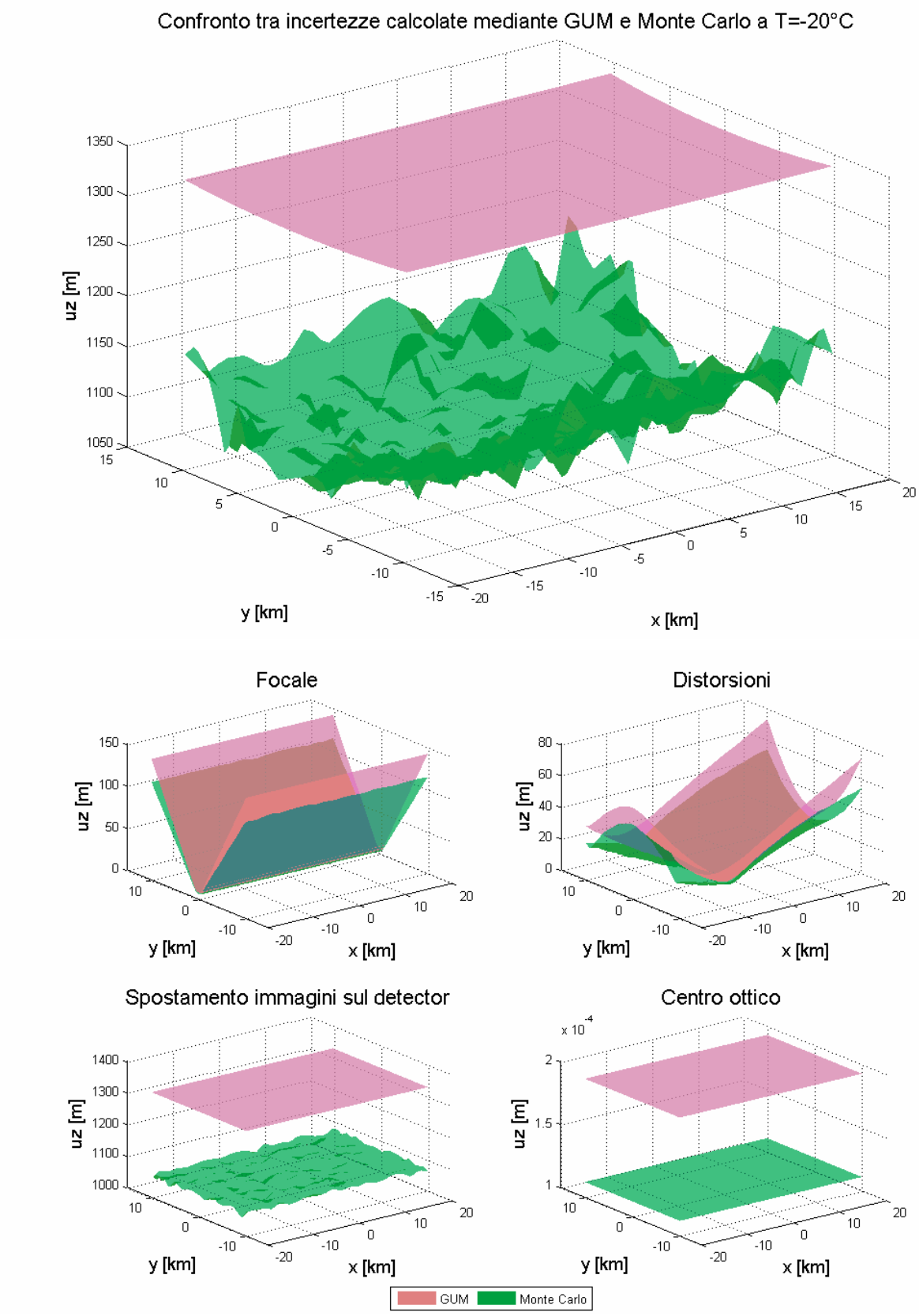


Figura VII.2 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: prismi e lenti vincolati tramite incollaggio.

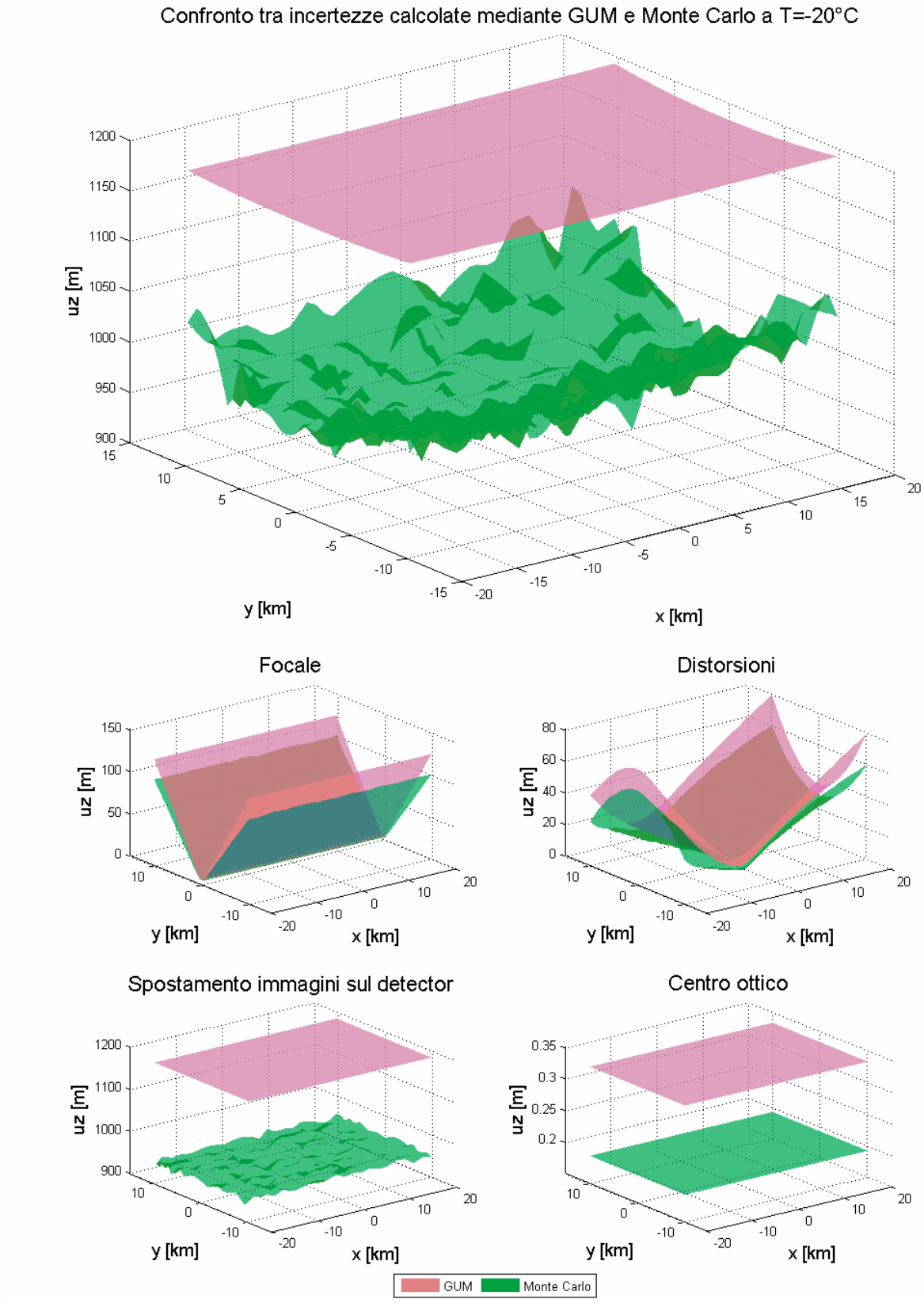


Figura VII.3 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dei soli prismi vincolati tramite incollaggio.

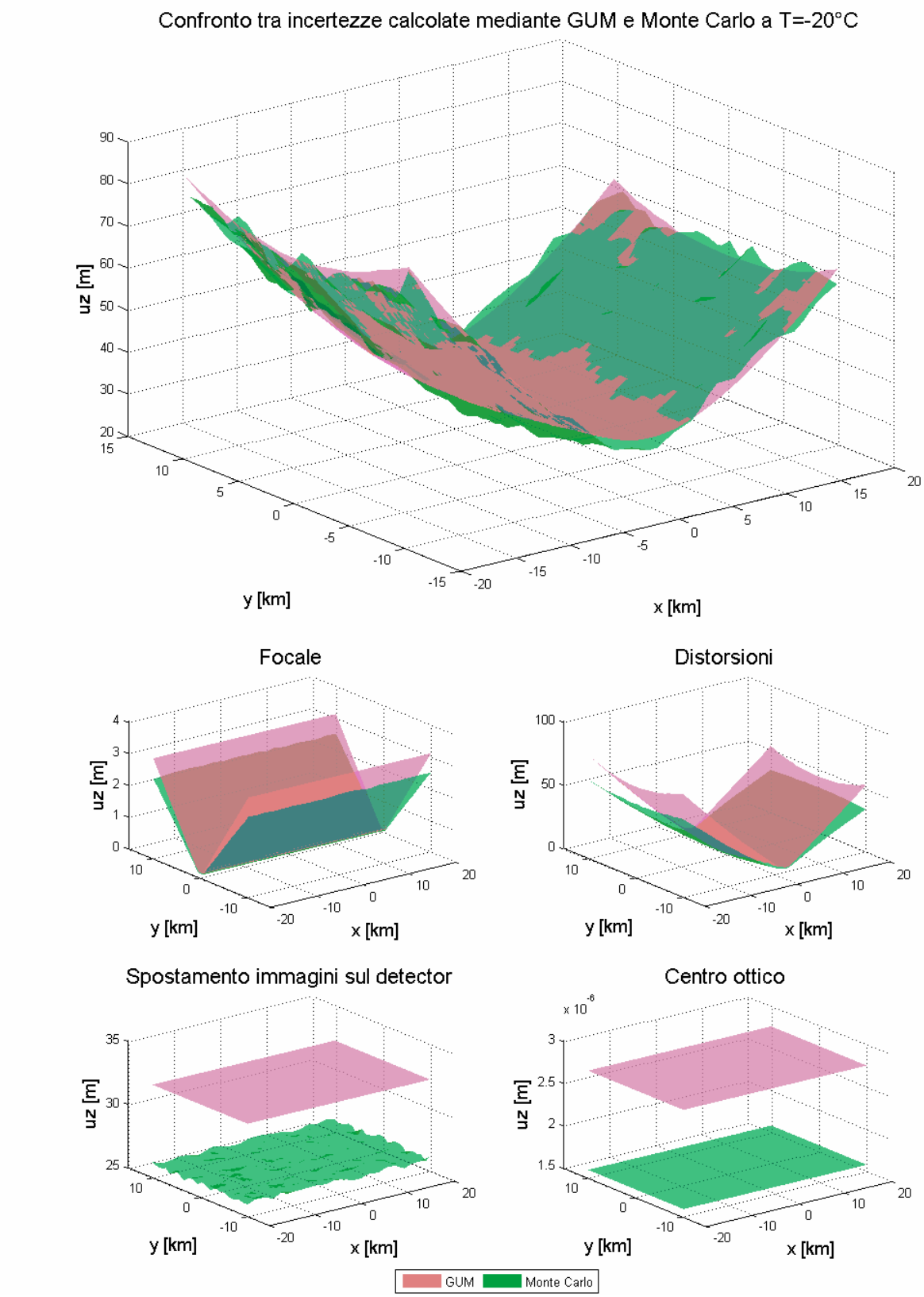


Figura VII.4 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto delle sole lenti vincolate tramite incollaggio.

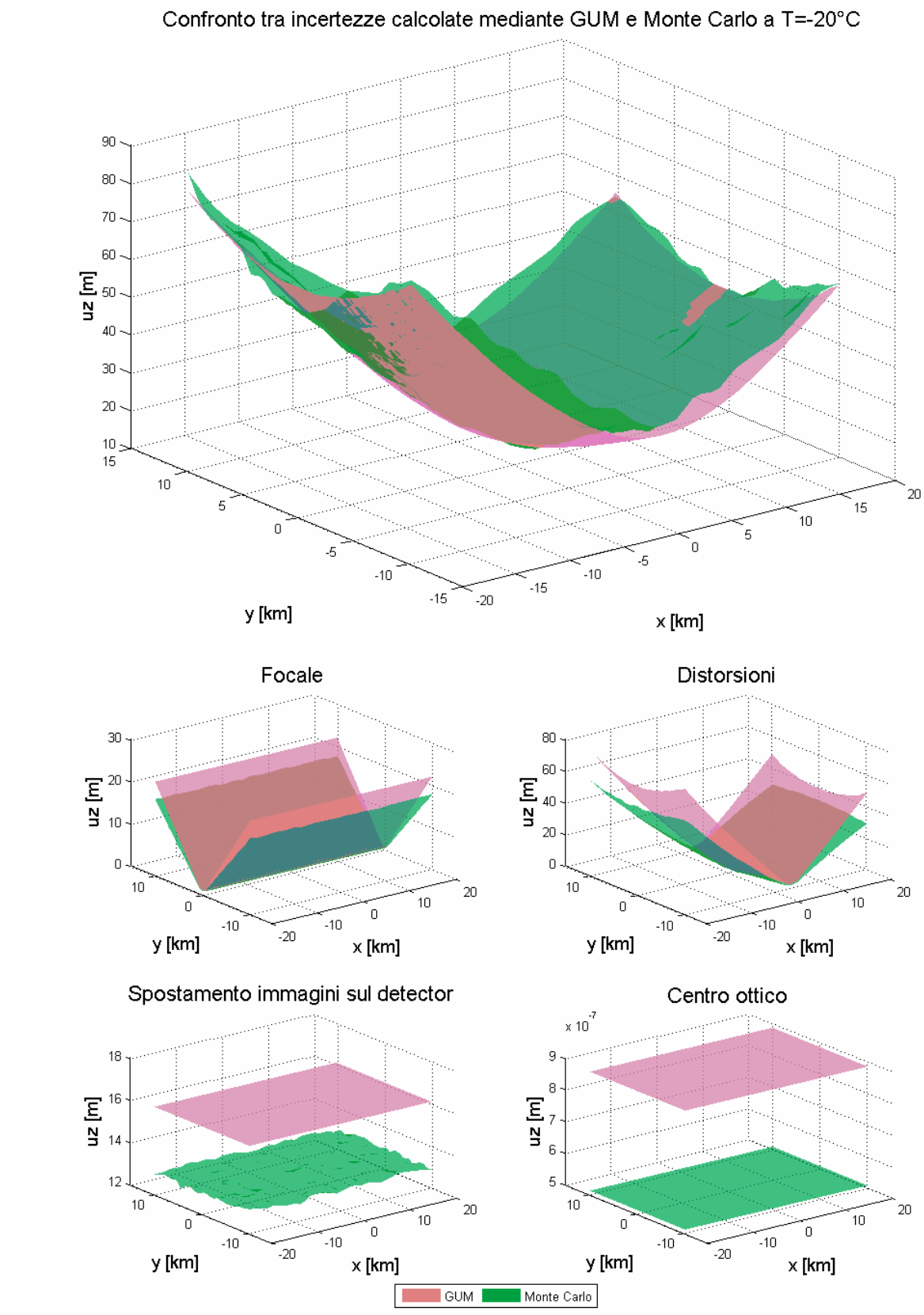


Figura VII.5 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dello specchio M1.

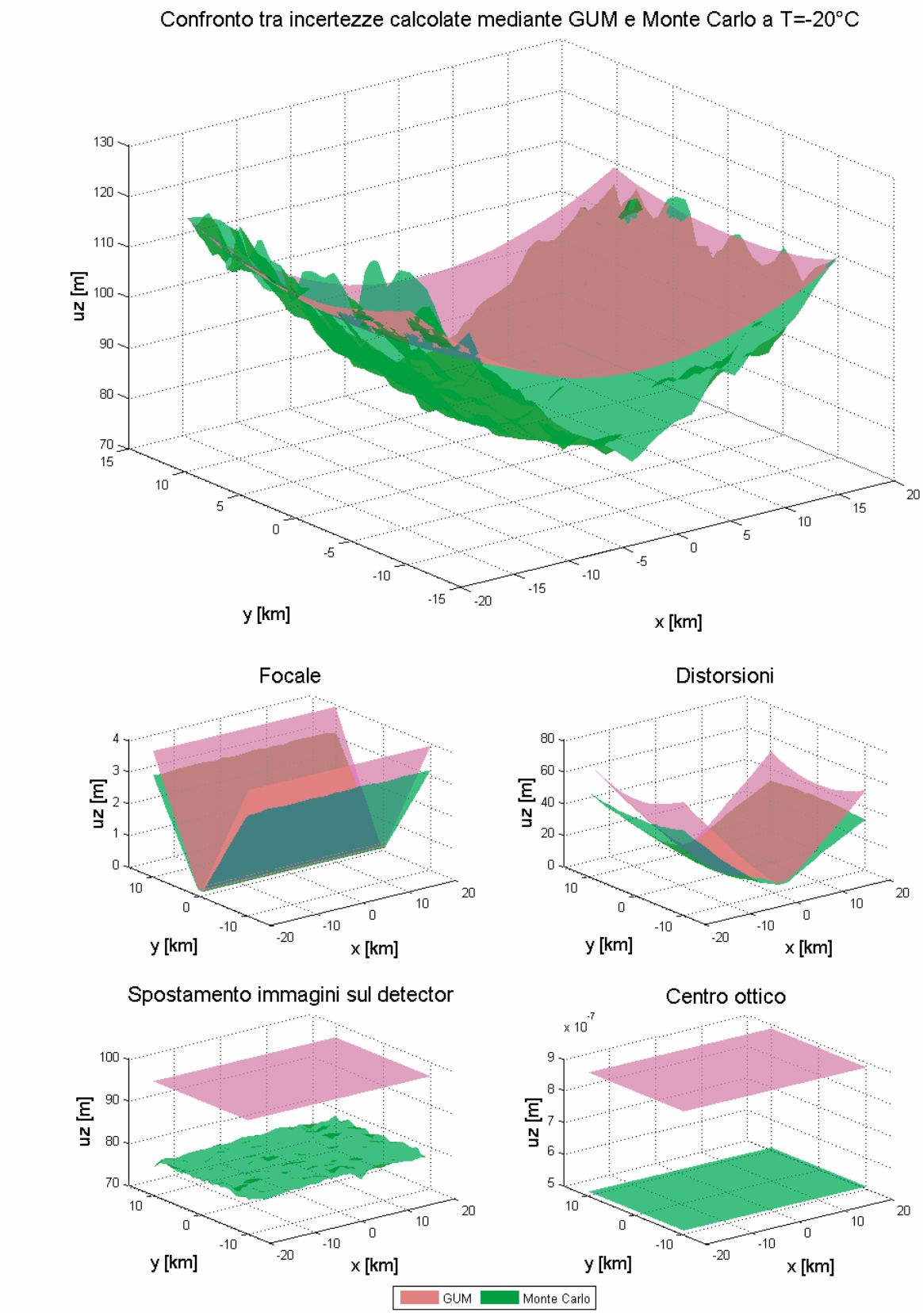


Figura VII.6 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dello specchio M2.

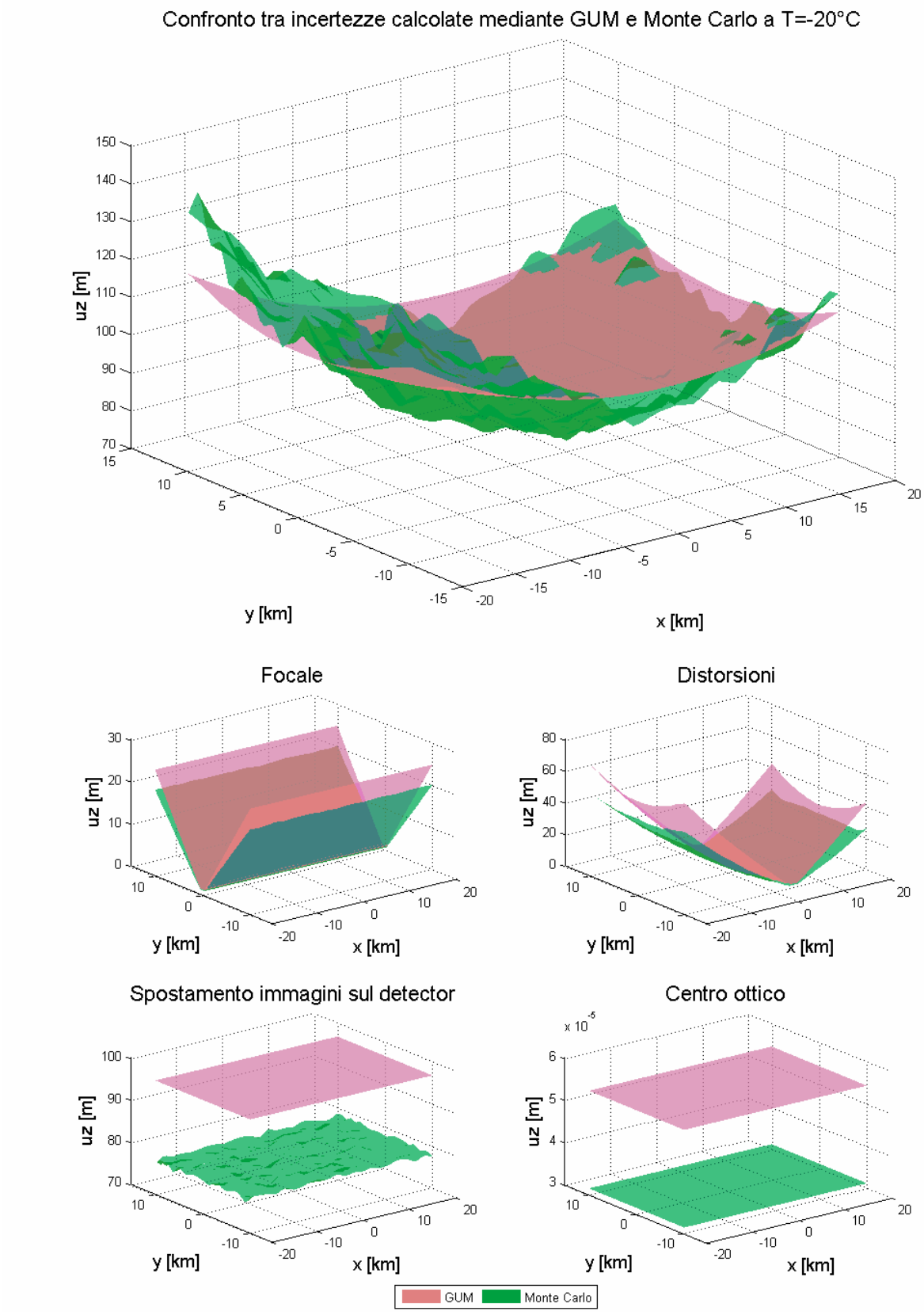


Figura VII.7 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: prismi e lenti vincolati cinematicamente.

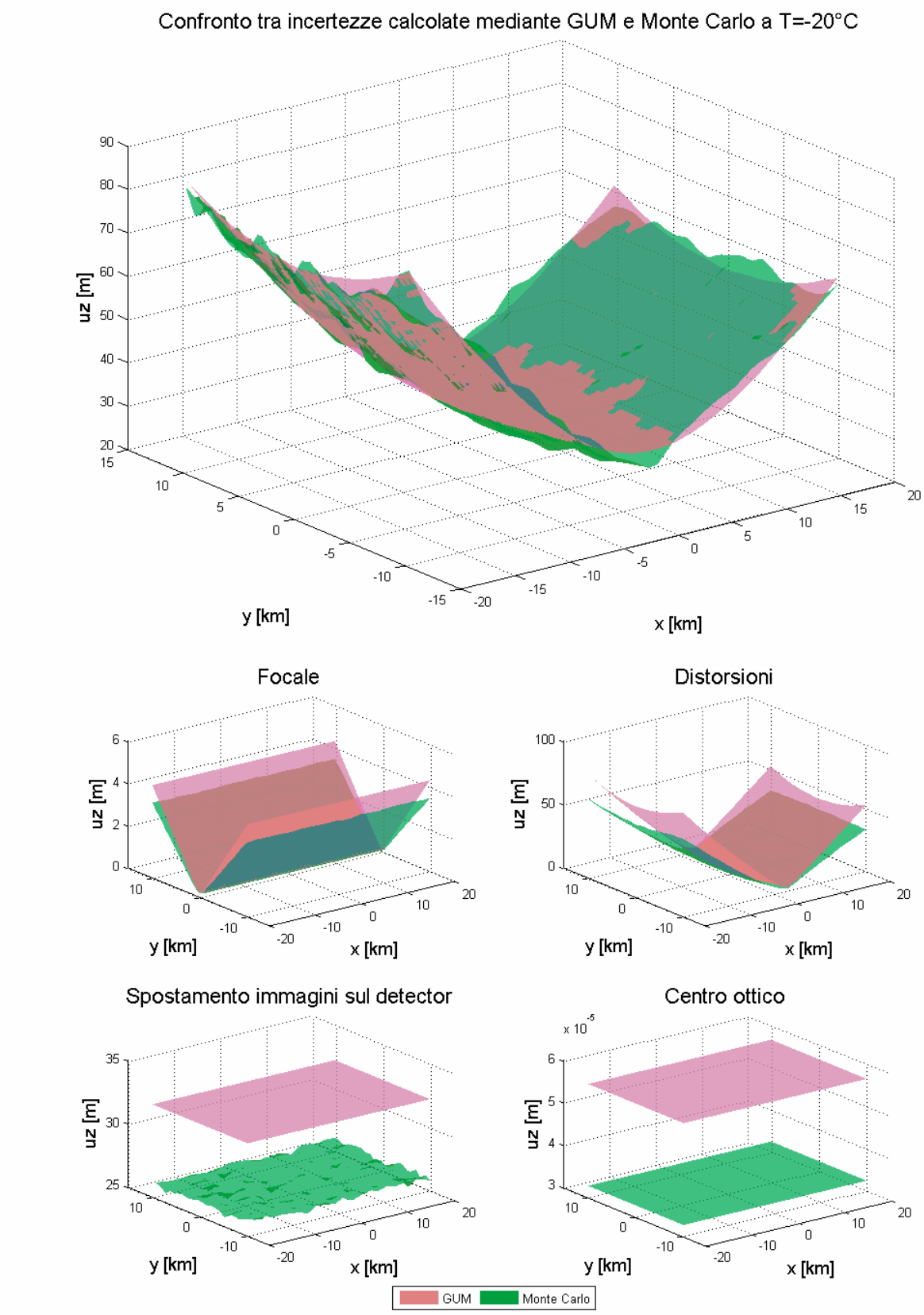


Figura VII.8 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto dei soli prismi vincolati cinematicamente.

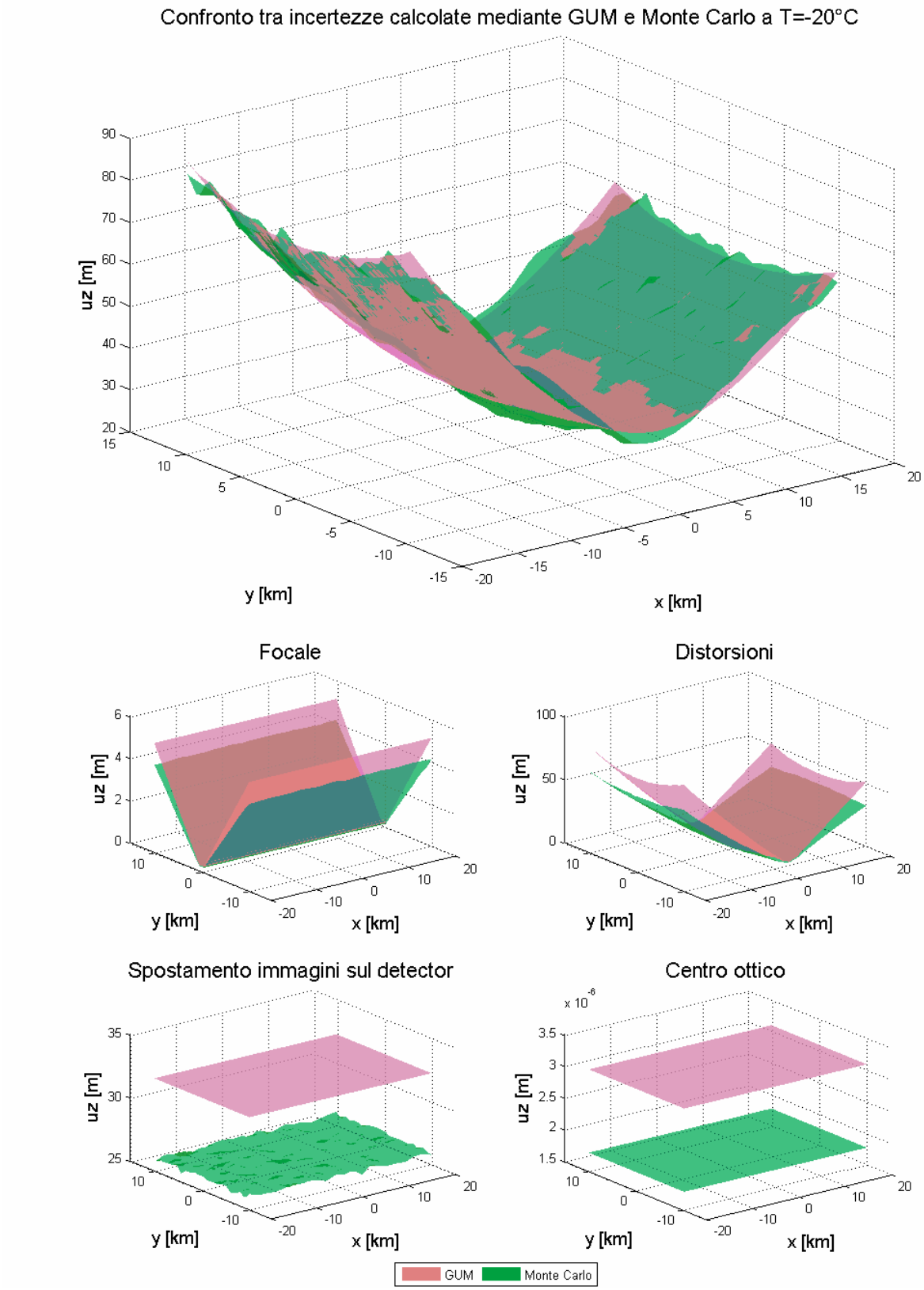


Figura VII.9 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo le metodologie GUM e Monte Carlo a T=-20°C: effetto delle sole lenti vincolate cinematicamente.

Tabella VII.1 – Incertezza massima valutata mediante la metodologia GUM sulla determinazione della profondità della superficie di Mercurio a T=20°C ed a T=-20°C.

Configurazione della stereocamera		**Incertezza massima [m]**
Prismi incollati, lenti incollate, specchi	T=-20°C	1339,19
Prismi incollati		1193,76
Lenti incollate		86,78
Specchio M1		83,50
Specchio M2		120,07
Prismi con vincoli cinematici, lenti con vincoli cinematici, specchi		121,70
Prismi con vincoli cinematici		87,44
Lenti con vincoli cinematici		89,60
Temperatura di integrazione	T=20°C	79,27

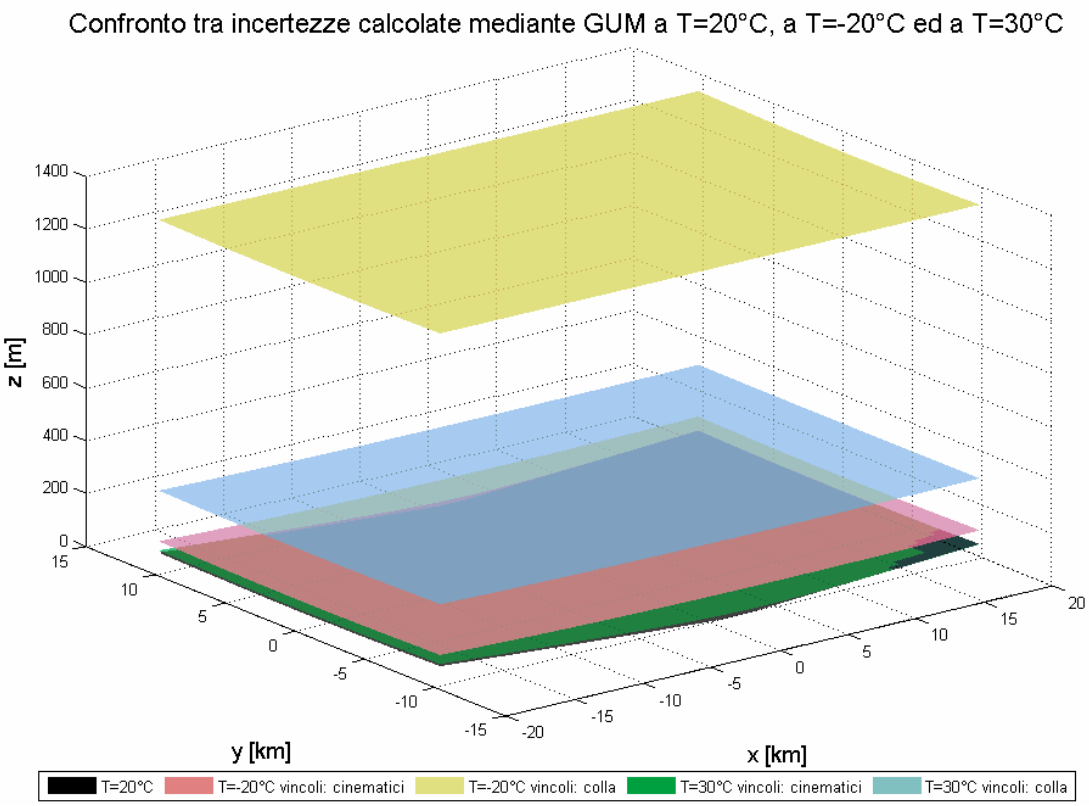


Figura VII.10 – Incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio valutata secondo la metodologia GUM a temperatura di integrazione, a T=-20°C ed a T=30°C: effetto degli elementi ottici vincolati sia cinematicamente che mediante incollaggio.

Tabella VII.2 – Incertezza massima valutata mediante la metodologia GUM sulla determinazione della profondità della superficie di Mercurio a T=20°C, a T=-20°C ed a T=30°C.

Configurazione della stereocamera		**Incertezza massima [m]**
Prismi incollati, lenti incollate, specchi	T=-20°C	1339,19
Prismi con vincoli cinematici, lenti con vincoli cinematici, specchi		121,70
Prismi incollati, lenti incollate, specchi	T=30°C	313,55
Prismi con vincoli cinematici, lenti con vincoli cinematici, specchi		87,64
Temperatura di integrazione	T=20°C	79,27

Capitolo VIII

SETUP STRUMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI E DELLE ROTAZIONI ALL'INTERNO DELLA STEREOCAMERA

VIII.1 GRANDEZZE DA MISURARE E CONDIZIONI OPERATIVE

La presente ricerca, volta all'analisi delle prestazioni della stereocamera ed, in particolar modo, ai disturbi dovuti ai parametri termomeccanici che possono causare un disallineamento e la rotazione dei componenti optomeccanici che costituiscono lo strumento, prevede la realizzazione di un setup sperimentale che consenta di determinare l'entità degli spostamenti e delle rotazioni degli elementi ottici al limite delle condizioni operative.

I principali requisiti che devono essere soddisfatti da STC, a 400km dal pianeta (corrispondente al Periermio) sono: una risoluzione di 50m sull'area visionata, un'accuratezza di 85m lungo la terza dimensione (Nadir) corrispondente alla profondità all'interno di un intervallo operativo di temperatura compreso tra –20°C e +30 °C. Si prevede un'integrazione dello strumento a +20°C, e quindi questa temperatura verrà considerata come temperatura iniziale.

Di seguito si possono vedere dei disegni costruttivi relativi alla stereocamera che permettono di comprendere la sua configurazione al momento in cui venne ideato il setup strumentale, questa non costituisce l'ultima versione attualmente disponibile. In Fig.VIII.1 è illustrata la disposizione dei tre strumenti di misura HRIC, STC e VIHI in una delle prime configurazioni della suite.

In Fig.VIII.2 è rappresentata la stereocamera con e senza il coperchio protettivo. Per vedere l'ultima versione della stereocamera si rimanda al Cap.III.

Nel disegno di Fig.VIII.3 è visibile l'interno della stereocamera dove si possono vedere i due baffles, l'insieme delle lenti, i due specchi (sferico e piano) che riflettono l'immagine al detector, muniti dei rispettivi supporti.

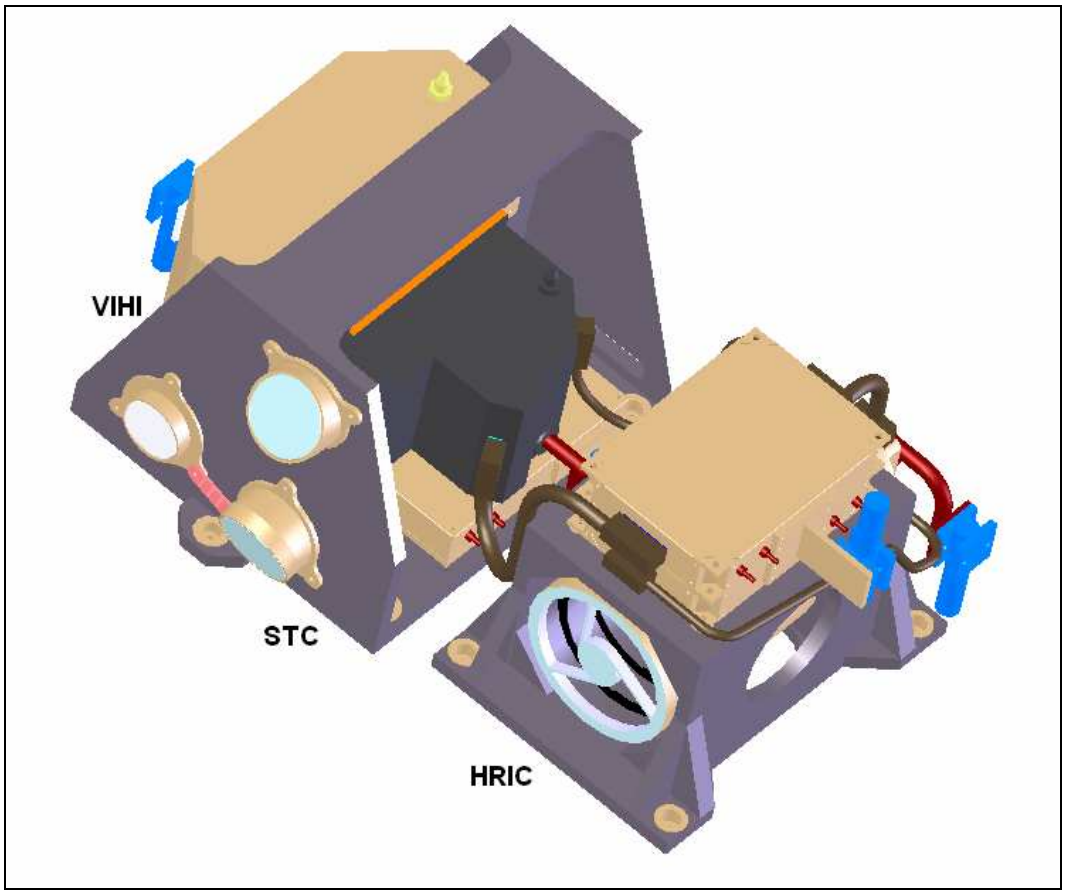
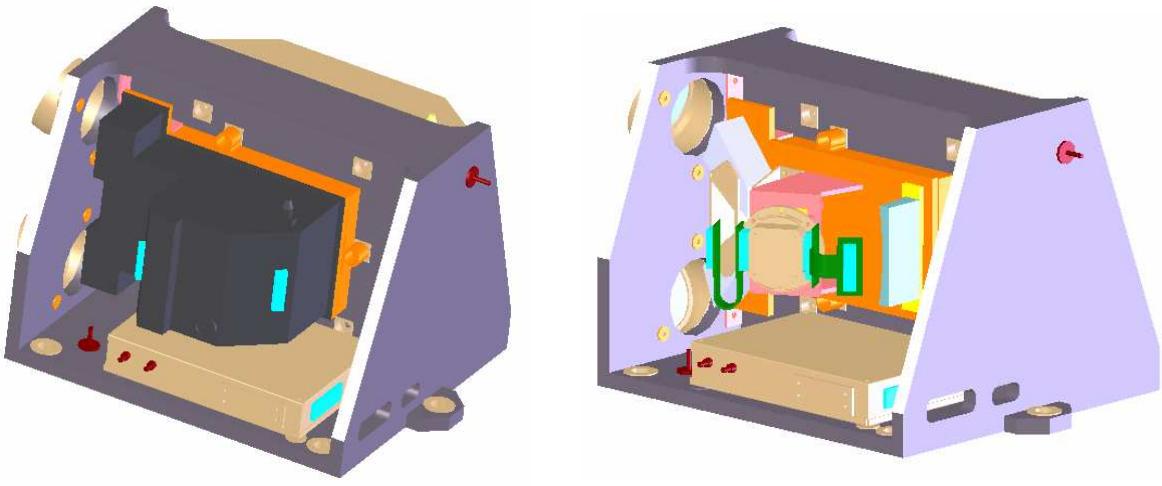


Figura VIII.1 –Particolare dell'interno di SIMBIO-SYS con evidenziata la disposizione degli strumenti HRIC, STC e VIHI.



(a) (b)

Figura VIII.2 – STC (Stereo Channel): (a) avvolta dal coperchio protettivo (in grigio scuro); (b) senza coperchio protettivo.

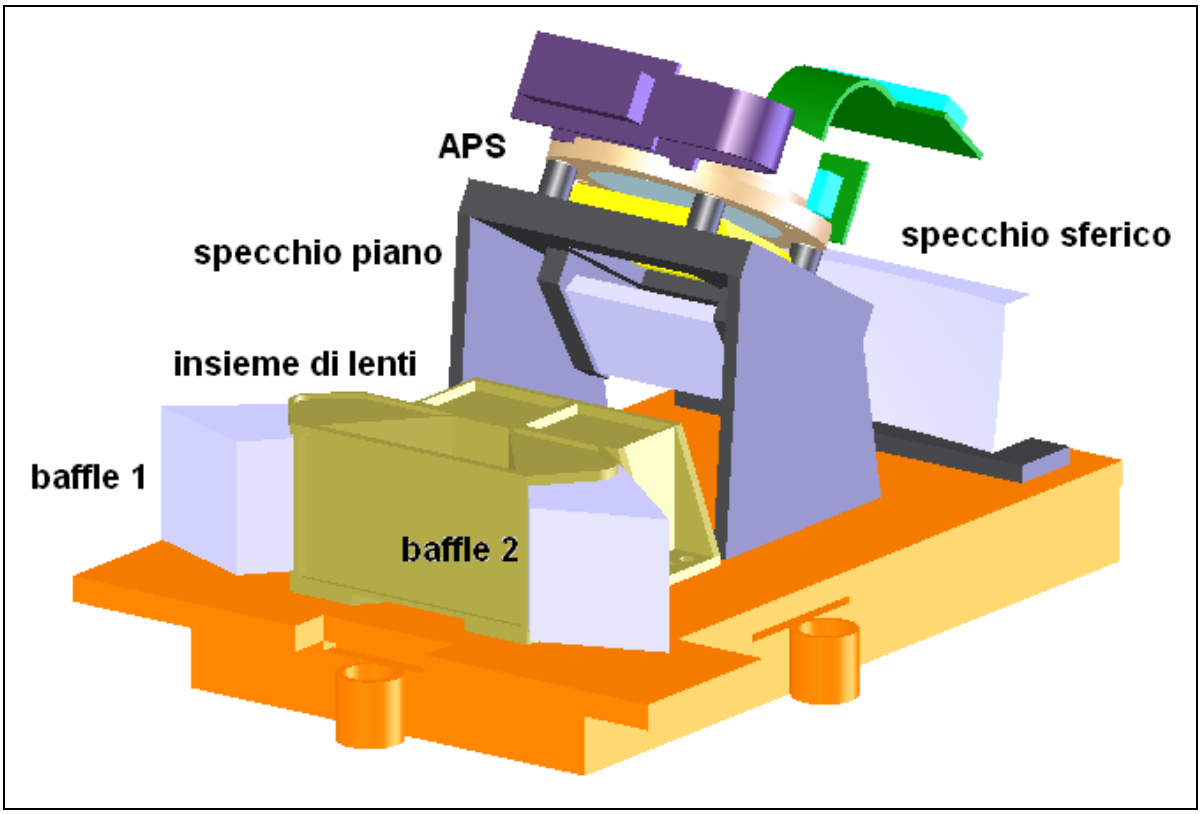


Figura VIII.3 – Interno dell'STC con illustrati i componenti ottici e di supporto.

VIII.2 SETUP SPERIMENTALE PER LA TARATURA DELLA STEREOCAMERA

VIII.2.1 Considerazioni preliminari

Il setup strumentale in esame servirà per la caratterizzazione degli spostamenti e delle rotazioni dei supporti per lo specchio piano e per quello sferico presenti all'interno della stereocamera, in quanto questi sono stati individuati come elementi critici per la funzionalità dello strumento (vedi Cap.VI).

Inizialmente sono state valutati diversi tipi di setup per raggiungere questo scopo. Da uno studio preliminare emergono quindi i requisiti che il setup strumentale dovrà soddisfare:

- il sistema di misura dovrà essere in grado di operare sulla strumentazione posta in camera di vuoto;
- dovrà essere, inoltre, in grado di rilevare gli spostamenti e le rotazioni dei supporti degli specchi con una precisione di micrometrica;
- il setup strumentale dovrà essere utilizzato su target di alluminio;

Un vincolo fondamentale del setup strumentale è rappresentato dal basso effetto di carico: esso, infatti, non dovrà influire sugli spostamenti e le rotazioni degli elementi ottici e, quindi, dovrà eseguire le misure senza contatto.

Sono state vagliate alcune con i rispettivi pregi e difetti al fine di individuare quella più idonea. Dall'uso di tecniche fotografiche avvalendosi dell'utilizzo di una fotocamera in grado di rilevare delle immagini del banco ottico una volta rimosso il coperchio superiore per garantire la visibilità. Il cui limite principale è attribuibile alla risoluzione del dispositivo e alla realizzazione di un'illuminazione adeguata, oltre all'attenta analisi del posizionamento della fotocamera dentro la camera di vuoto, o fuori permettendo lo svolgimento della prova grazie ad una finestra opportuna.

Il limite principale di questo sistema di misura, che è rappresentato dalla risoluzione, non consente però il suo utilizzo, in quanto non risultano rilevabili spostamenti a livello micrometrico.

In secondo luogo è stata valutata l'opportunità di utilizzare un interferometro laser, un sistema di misura in grado di garantire una maggiore precisione (fino al nanometro). L'apparato strumentale dovrebbe essere dotato di un interferometro laser, di una camera di vuoto dotata di una finestra che permetta al laser di raggiungere il suo interno.

L'interferometro esegue misure di tipo puntuale, in commercio esistono anche interferometri dotati di 2, 3, 6 o anche 8 assi. Più assi sono necessari per poter valutare le rotazioni dei target.

Lo svantaggio di questo metodo di misura è rappresentato dagli errori che vengono introdotti dal passaggio del raggio laser attraverso il vetro della finestra della camera di vuoto.

Sono stai poi considerati diversi tipi di sensori senza contatto, da quelli a triangolazione laser a quelli capacitivi a quelli a correnti parassite.

I primi presentano dei problemi nell'utilizzo a basse temperature, per cui dovrebbero essere provvisti di un involucro che li isoli termicamente per essere inseriti in camera di vuoto. Oppure dovrebbero essere posti all'esterno di questa, permettendo al raggio laser di passare attraverso un'opportuna finestra.

In commercio quelli che attualmente raggiungono la maggiore distanza di misura arrivano fino a 400mm.

Se inseriti all'interno della stereocamera della missione BepiColombo il loro ingombro potrebbe risultare un problema, visto che per quelli più piccoli disponibili in commercio si aggira circa su 60mm*80mm*30mm senza involucro protettivo.

Quelli che vengono disposti a piccole distanze, come ad esempio 2mm, dal target, forniscono una precisione di misura dello 0,03% del fondo scala circa, che si aggira sui 6μm.

I sensori capacitivi possono funzionare fino a circa -120°C. Essi vanno posizionati di fronte al target in esame, del quale misurano lo spostamento lungo un solo asse. La misura che effettuano è di tipo puntuale, è necessario usarne più di uno per rilevare gli spostamenti e le rotazioni. I cavi collegati allo

strumento devono essere collegati alla parte elettronica che si trova all'esterno della camera da vuoto.

Per essere inseriti all'interno della stereocamera bisogna verificare che il loro ingombro non sia un problema. Le dimensioni sono ridotte, per un sensore che misuri a 2mm di distanza si possono avere un diametro di 20mm ed una profondità di 24mm.

La loro linearità in genere si aggira sullo 0,2% del fondo scala (ad una distanza di 2mm significa 4μm). La stabilità del sensore con la temperatura può essere di circa 0,17μm/°C.

Infine i sensori a correnti parassite che possono agire senza che si verifichi un contatto con il target. Hanno range di temperatura molto elevati, da -55°C a +175°C, e risoluzione che può raggiungere lo 0,1% del fondo scala (se operativi ad una distanza di 1mm, significa 1 μm di risoluzione).

VIII.2.2 Sensore idoneo allo svolgimento delle misurazioni

In questo frangente è stato individuato un sensore di spostamento a correnti parassite prodotto da Microstrain. che può misurare lo spostamento di target di metallo senza necessità di contatto fisico. Si chiama NC-DVRT-1.0 e ad esso è abbinata una centralina elettronica, DEMOD-DVRT.

Un'immagine del sensore si può vedere nella seguente figura, dove sono evidenziate le sue dimensioni.

Figura VIII.4 – Sensore NC-DVRT-1.0 prodotto da Microstrain.

Due bobine sono poste all'interno dell'alloggiamento del sensore DVRT e formano i relativi elementi di compensazione e di rilevamento. Quando il trasduttore viene posto di fronte ad un target ferroso o di materiale altamente conduttivo, la riluttanza di una delle due bobine cambia, mentre la bobina di compensazione funziona come riferimento. Le bobine sono alimentate da un'eccitazione sinusoidale ad

alta frequenza e la loro differenza di riluttanza viene misurata tramite un demodulatore. La differenza che si verifica tra gli outputs delle due bobine fornisce una misura di posizione, annullando l'effetto della variazione di temperatura. I target ferrosi fanno alterare la riluttanza della bobina sensibile modificando la permeabilità del circuito magnetico; i target conduttivi, come ad esempio l'alluminio, sfruttano l'interazione delle correnti parassite indotte sulla superficie del target con il campo creato attorno alla bobina sensibile.

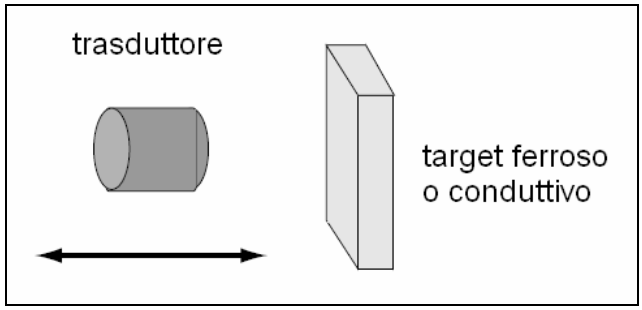


Figura VIII.5 – Schema di funzionamento del sensore di spostamento NC-DVRT-1.0.

Questo tipo di sensore pone un vincolo sulla distanza massima attuabile con il target, le sue caratteristiche si possono vedere nelle seguenti tabelle.

Tabella VIII.1 – Specifiche elettriche del sensore NC-DVRT abbinato alla centralina DEMOD-DVRT.

Electrical Specifications with Microstrain's DEMOD-DVRT	
Measurement range NC-DVRT-0.5 NC-DVRT-1.0 NC-DVRT-1.5 NC-DVRT-2.5	 0.5 mm 1.0 mm 1.5 mm 2.5 mm
Nonlinearity	exponential output
Sensitivity	5 volts/mm typical
Signal to noise	Standard - 1000 to 1 with filter 3 dB down at 1 KHz
Resolution	0.1% minimum
Frequency response	800 Hz standard, 20 KHz optional
Temperature coefficient	offset 0.0039%/°C (typical) span 0.016%/°C (typical)
Repeatability	±2 µm typical (at constant temperature)

Tabella VIII.2 – Specifiche meccaniche del sensore NC-DVRT.

Mechanical Specifications	
Size NC-DVRT-0.5 NC-DVRT-1.0 NC-DVRT-1.5 NC-DVRT-2.5	diameter x length (thread) 2.84 mm x 8.4 mm (4-40 UNC-2A) 4.83 mm x 19.0 mm (10-32 UNF-2A) 6.35 mm x 19.0 mm (¼-28 UNF-2A) 12.70 mm x 19.0 mm (½-20 UNF 2A)
Housing material	300 series stainless steel
Fixturing method	threaded stainless nuts
Leadouts	45 cm, shielded, teflon insulated
Strain Relief	Stainless wire reinforced multistrand conductors
Connector	Lemo 4-pin male with shrink polyolefin covering
Operating temperature	-55 to 175 °C

Il sensore che si è scelto di utilizzare, NC-DVRT-1.0, opera ad una distanza massima di 1mm dal target. Questo evidenzia uno dei requisiti indispensabili nella progettazione del setup di strumentazione, e cioè che deve essere idoneo a consentire una vicinanza adeguata tra sensore e target.

VIII.2.3 Allestimento del setup strumentale

Gli esperimenti avranno luogo in camera di vuoto dove è presente una piastra in acciaio dotata di fori M5 posti tra di loro ad una distanza variabile tra i 70mm ed i 90mm.

Sopra di essa sarebbe opportuno posizionare una piastrina che possa essere forata a piacere, a seconda della posizione in cui andranno montati i componenti. Una piastrina da poter forare a piacere permetterebbe anche di potersi adeguare ad eventuali modifiche effettuate sui componenti presenti.

VIII.2.3.1 Caratteristiche dei portaspecchi

I due porta specchi dei quali si vogliono caratterizzare gli spostamenti e le rotazioni sono mostrati nelle figure seguenti, dove si possono vedere l'interno della stereocamera con gli elementi di interesse:

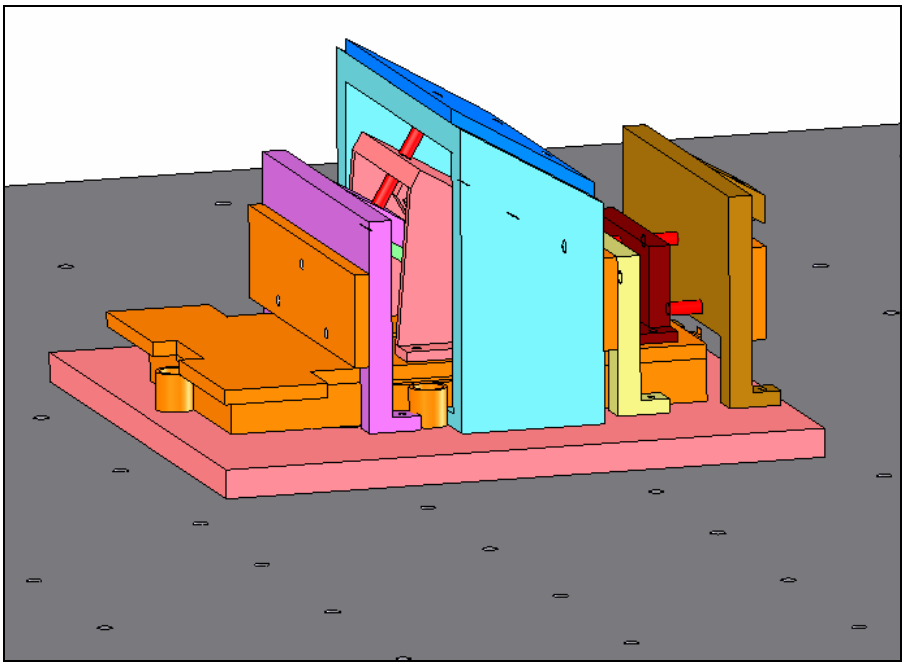


Figura VIII.6 – Allestimento del setup strumentale in camera di vuoto, si possono notare la piastra presente in camera di vuoto, la piastrina che verrà utilizzata per alloggiare i target ed i sensori e gli strumenti ottici da analizzare.

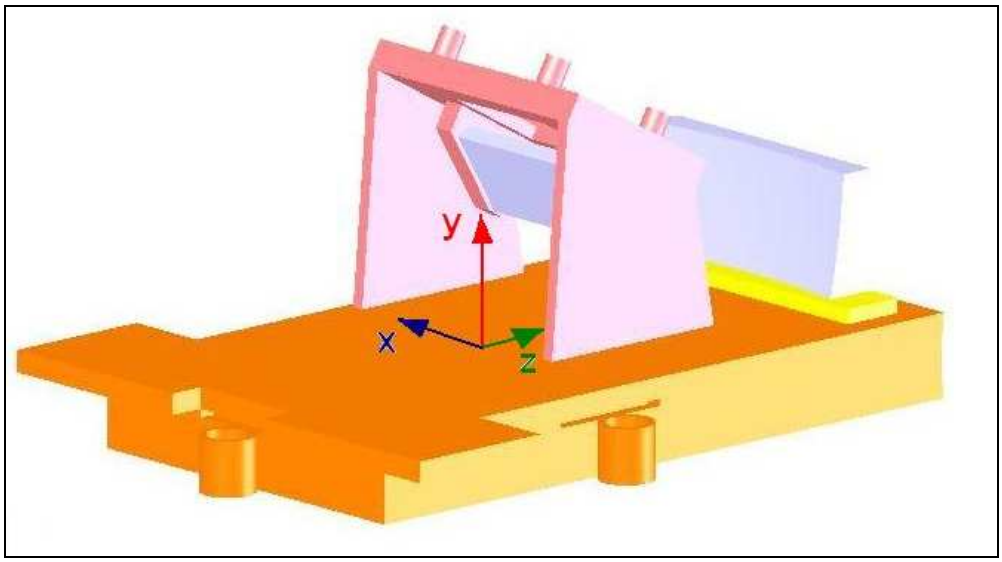


Figura VIII.7 – Particolare dell'interno della stereocamera: supporto per lo specchio piano (in rosa), supporto per lo specchio sferico (in giallo).

Da progetto essi sono posti ad una distanza di 32,46mm. Sia la base sottostante che i supporti per gli specchi verranno realizzati in alluminio.

La base che porterà gli strumenti ottici sarà vincolata a bordo della sonda in modo tale da poterne consentire le dilatazioni dovute agli sbalzi termici. Per rendere una situazione analoga nell'ambito della

taratura si è pensato di vincolarla alla piastrina posta nella camera di vuoto tramite un unico foro ricavato al centro di essa.

In questo modo la base non sarà vincolata ai suoi estremi e sarà libera di subire le variazioni di dimensione dovute al mutare delle condizioni ambientali. Su di essa verranno posti i porta specchi mediante collegamenti filettati. Gli ingombri sono illustrati in Fig.VIII.8.

Nel caso del porta specchio piano, stabilito un sistema di riferimento ad esso solidale, come in Fig.VIII.9, si vogliono ricavare lo spostamento lungo l'asse Z e le rotazioni lungo gli assi X e Y. Questo specchio è inclinato di 30° rispetto alla terna principale di Fig.VIII.9.

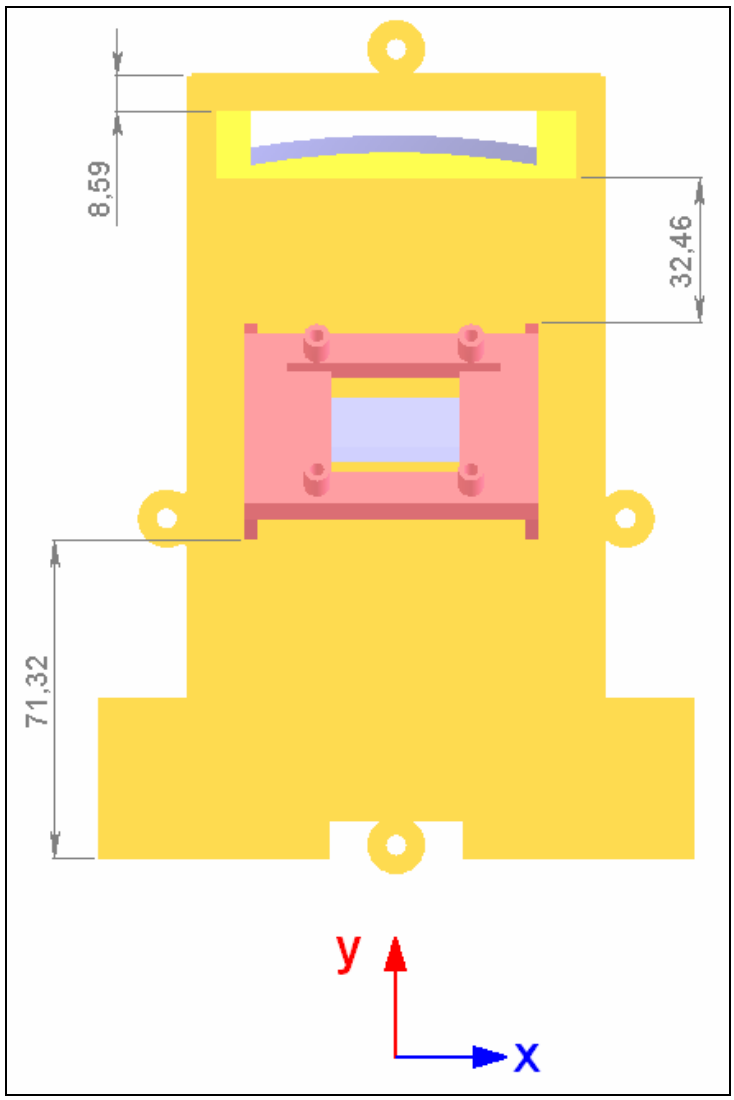
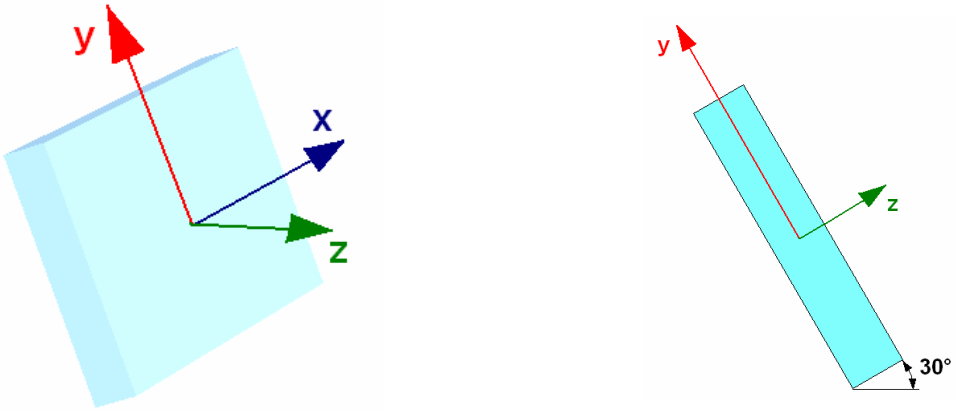


Figura VIII.8 – Ingombri all'interno della stereocamera.

Nel caso del porta specchio sferico, invece, l'attenzione verrà posta sugli spostamenti lungo gli assi

Y e Z e sulle rotazioni lungo gli assi X e Y della terna solidale allo specchio di Fig.VIII.10.



(a) (b)

Figura VIII.9 – Particolari dello specchio piano.

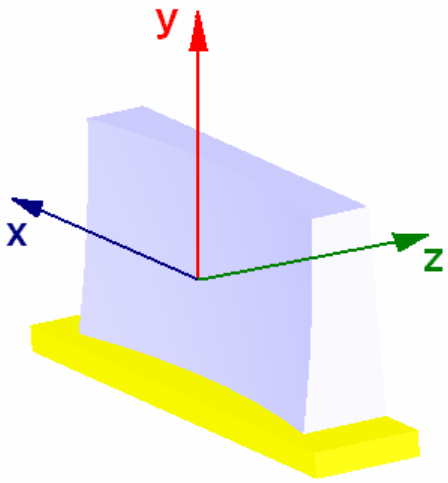


Figura VIII.10 – Particolari dello specchio sferico.

Infine si vogliono effettuare delle misure anche sulla sommità del porta specchio piano, rilevando gli spostamenti e le rotazioni in modo analogo a quello per il centro dello specchio piano, come illustrato sopra. In questo caso la superficie è inclinata di 60°.

Sull'involucro che racchiude il sensore da utilizzare è stata ricavata una filettatura che permette il suo inserimento in opportune fori.

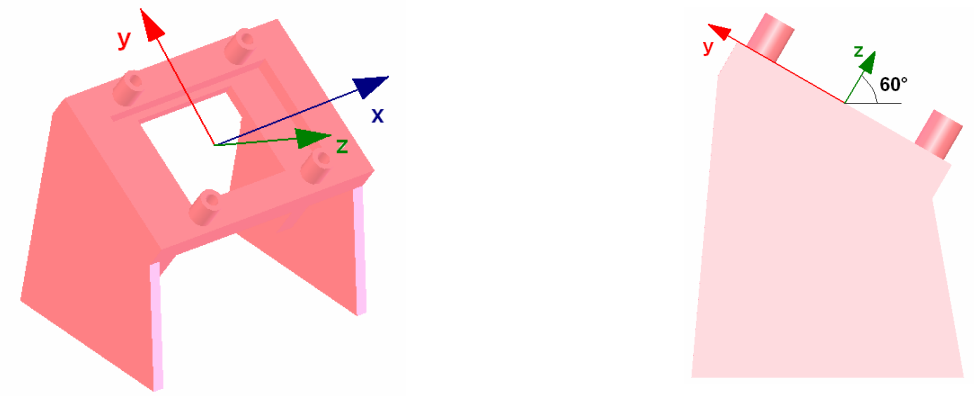


Figura VIII.11 – Particolari della parte superiore del porta specchio piano.

Devono quindi essere utilizzati dei componenti in grado di portare i sensori ad una distanza opportuna dal target senza che ci siano degli accoppiamenti tra di essi e gli oggetti ai quali sono vincolati gli elementi da analizzare.

VIII.2.3.2 I dispositivi porta sensori

Per consentire l'avvicinamento del sensore al target sono stati definiti dei pezzi da realizzare in modo tale da poter inserire il sensore mediante un collegamento filettato, e in grado di non essere accoppiati alla base che funge da supporto per la stereocamera, in modo da non avere come effetto di disturbo la sua dilatazione. Gli elementi che consentiranno l'avvicinamento dei sensori al target devono essere vincolati alla piastrina che viene posta sopra quella esistente in camera di vuoto, inoltre il setup deve essere realizzato in un materiale dotato di un coefficiente di dilatazione termica molto basso, in modo da introdurre durante la misurazione gli errori più piccoli possibile.

Gli elementi costituenti la stereocamera sono in alluminio, ed hanno un coefficiente di dilatazione termica lineare di $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}.

VIII.2.3.3 Lega SuperInvar 32-5

Negli ultimi anni è stata introdotta in campo astronomico una nuova lega dotata di un coefficiente di dilatazione termica lineare di due ordini di grandezza inferiore rispetto a quello dell'alluminio, essa infatti viene spesso utilizzata all'interno degli strumenti ottici per l'astronomia. Si tratta della lega Superinvar, le cui caratteristiche sono riportate nella seguente tabella. In particolare è interessante notare

il coefficiente di dilatazione termica lineare estremamente basso, pari a $6{,}3 \cdot 10^{-7}$ °C^{-1}.

Tabella VIII.3 – Composizione delle lega Superinvar 32-5.

SuperInvar 32-5	
Elemento	**Analisi chimica**
Carbone	0,05
Nickel	31,75
Ferro	Equilibrium
Silicio	0,09
Manganese	0,39
Cobalto	5,36
Zolfo	0,01
Cromo	0,03
Alluminio	0,07
Rame	0,08

Come si può vedere dai dati sopra riportati il Superinvar 32-5 è una lega solida magnetica austenitica che contiene principalmente Ferro, Nickel e Cobalto. Inoltre questa lega garantisce la stabilità all'austenite fino ad una temperatura di -55°C.

Per questo motivo questo materiale trova impiego nella realizzazione di elementi strutturali e di supporto all'interno di sistemi ottici e laser che richiedano misure precise. Inoltre, questa lega viene utilizzata anche nei tubi guida delle onde ed in altri sistemi che richiedano metalli connessi ad assiemi vetro/quarzo in congiunzione con un basso coefficiente di dilatazione termica.

Nella tabella seguente vengono elencate le proprietà fisiche del SuperInvar.

Tabella VIII.4 – Proprietà fisiche e meccaniche della lega Superinvar 32-5.

Proprietà fisiche SuperInvar 32-5	
Densità	0,294 lb/in^3 8150 kg/m^3
Coefficiente di dilatazione termica	$0{,}35 \cdot 10^{-6}$ °F^{-1} (tra -67 °Fe +203°F) $0{,}63 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} (tra -55 °Fe +95°F)
Modulo di elasticità	$21 \cdot 10^{-6}$ psi $144 \cdot 10^{-6}$ MPa
Coefficiente di Poisson	0,23
MS Temperatura	-112 °F -80 °C
Resistività elettrica (RT)	80 μΩ·cm
Proprietà meccaniche SuperInvar 32-5	
0,2% resistenza	40 ksi 276 MPa
Durezza Rockwell B	75
Durezza Rockwell B	90

VIII.2.3.4 Progettazione meccanica dei porta sensori

I porta sensori devono essere realizzati in modo tale da consentire un'adeguata vicinanza al target senza che si verifichi alcun tipo di contatto con esso. La progettazione è risulta delicata a causa del ridotto spazio disponibile per il loro inserimento ed a causa della precisione richiesta nel loro allineamento.

Per questo è stato studiato un modo di vincolare i sensori realizzando dei fori che terminino con degli elementi che consentano al sensore di andare in battuta, ottenendo così un buon allineamento.

Si pone inoltre il problema di quanti sensori utilizzare: per una caratterizzazione di uno spostamento contemporaneamente a tre rotazioni, il numero idoneo di sensori è tre, messi a triangolo.

Con un'accurata progettazione dei porta sensori si è giunti alle seguenti configurazioni, per eseguire le prove sulla superficie del supporto dello specchio piano, Fig.VIII.13, sullo superficie posteriore dello specchio sferico, , Fig.VIII.14.

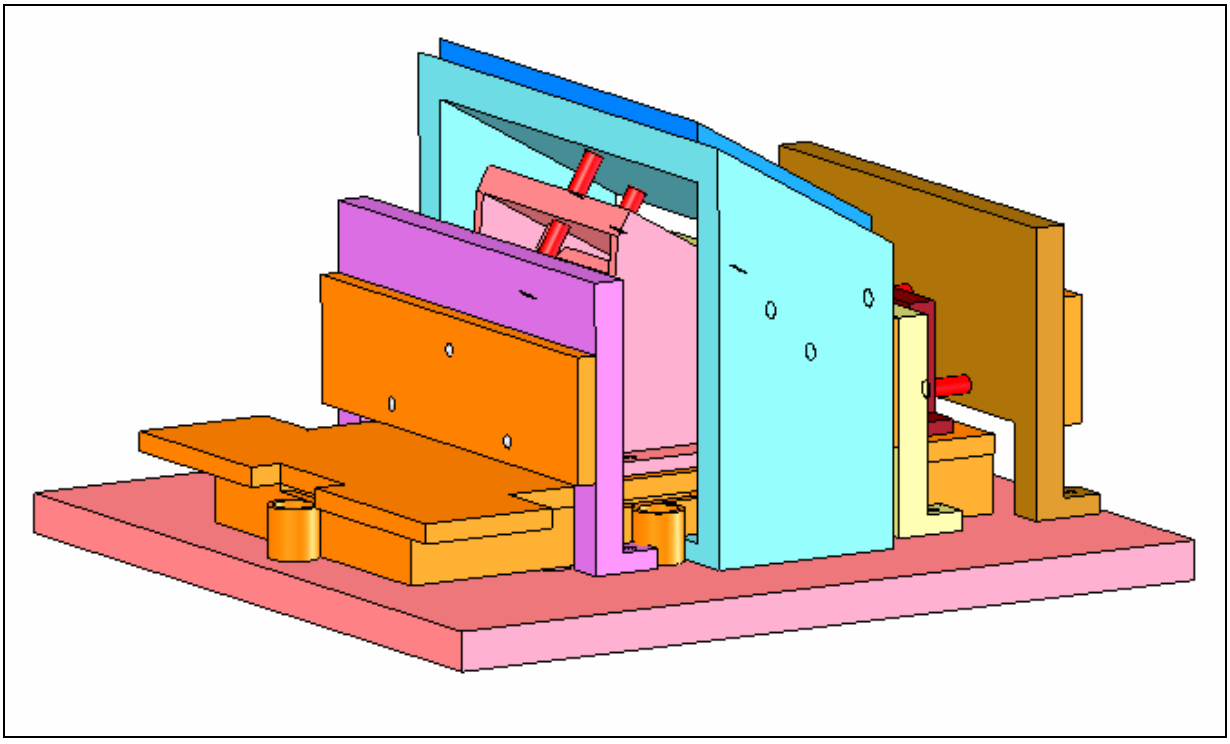


Figura VIII.12 – Setup strumentale per rilevare lo spostamento e le rotazioni della parte superiore del supporto dello specchio piano.

Gli elementi meccanici sono stati pensati in modo da poter essere costruiti mediante parti utilizzabili in più ripetizioni.

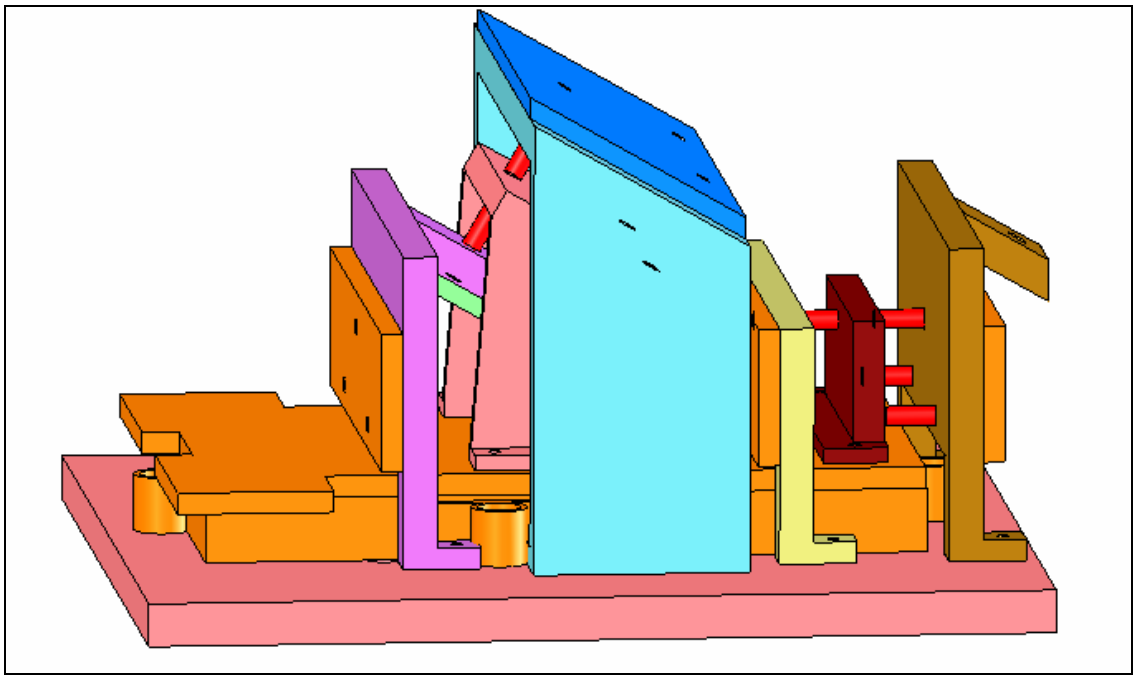
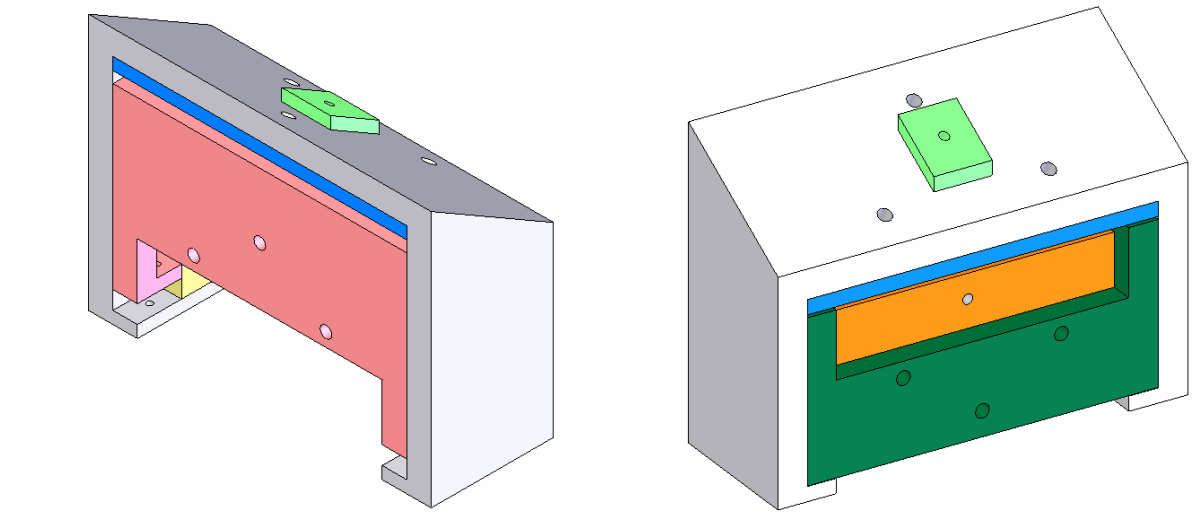


Figura VIII.13 – Setup strumentale per rilevare lo spostamento e le rotazioni dello specchio sferico.



(a) (b)

Figura VIII.14 – Elementi porta sensori per valutare gli spostamenti e le rotazioni: (a) dello specchio piano, (b e le rotazioni dello specchio

III.2.3.2.1 Valutazione del materiale più idoneo per i porta sensori

Il setup deve essere realizzato in modo tale che i sensori restino immobili il più possibile, per eseguire delle misure accurate. Per ottenere questo risultato deve essere posta particolare attenzione ai

materiali con cui costruire i porta sensori e la piastrina sulla quale verranno vincolati la base della stereocamera ed i porta sensori appunto.

Nota la relazione che permette di ricavare la variazione di dilatazione lineare di un oggetto dovuta ad una variazione di temperatura, sono state valutate gli spostamenti dello specchio sferico e di un sensore ad esso ortogonale, considerando diversi tipi di materiali.

Si consideri come elemento un elemento di fissaggio della stereocamera alla piastrina da disporre sopra la piastra presente in camera di vuoto un unico foro, in prossimità di esso viene fissata l'origine del sistema di riferimento fisso. Rispetto a questa quota si verificheranno gli spostamenti degli elementi a seguito delle variazioni dimensionali.

Come si può notare dai risultati, i dati migliori sono quelli relativi ad una piastrina e ad un porta sensori costituiti in Superinvar 32-5, per cui lo spostamento del sensore è di soli 0,9μm. In alternativa una soluzione accettabile è caratterizzata da una piastrina in Superinvar 32-5 e da un porta sensori in acciaio, lo spostamento di questo risulta però maggiore, pari a 6μm.

Di seguito vengono riportate le distanze previste tra i supporti degli specchi, che vincolano la sfruttabilità dello spazio in posizionare i sensori.

Alla luce delle considerazione precedentemente esposte sono stati pensati dei porta-sensori che possano rispondere a tutti i requisiti presenti.

Volendo caratterizzare oltre agli spostamenti le rotazioni è necessario poter disporre i sensori lungo una delle tre direzioni principali, in modo da poter ricavare la rotazione del target osservando la differenza di spostamento misurata dai due sensori.

La lega SuperInvar 32-5 viene venduta in blocchi a forma di parallelepipedo che poi devono essere lavorati a seconda delle esigenze.

Vedendo nel dettaglio i singoli pezzi sono stati pensati dotati di opportune battute che garantiscano il giusto inserimento.

Tramite delle piccole parti forma di parallelepipedo si può realizzare la battuta contro la quale andrà a fermarsi il sensore, in modo da poter controllare la istanza dal target (compresa nel range di 0,50mm-1,00mm). Questi elementi infatti sono dotati di fori idonei a far passare i cavi dei sensori, ma hanno un diametro inferiore a quello del sensore.

Si possono utilizzare fino ad un massimo di quattro sensori contemporaneamente, questo rappresenta il limite della centralina elettronica ad essi abbinata.

VIII.2.4 Pre-taratura del sensore in camera di vuoto

Il sensore Microstrain deve essere precedentemente tarato al fine di ricavarne una curva di

sensibilità che leghi le grandezze di ingresso (spostamento in micrometri) e di uscita (tensione in volt).

La catena di misura potrebbe essere costituita da una guida comandata mediante un computer, vincolato ad essa un target che si muove solidale, mentre il sensore resta immobile.

La centralina elettronica in dotazione rileva l'uscita in Volt.

Lo spostamento delle guida può essere monitorato mediante un interferometro laser.

VIII.3 SVOLGIMENTO DELLE MISURAZIONI

A causa del continuo evolversi del disegno meccanico della stereocamera non è stato possibile realizzare il setup strumentale sopra descritto, per questo, individuato lo specchio piano come elemento critico del quale misurare lo spostamento, sono state effettuate delle misure di spostamento mediante vibrometro laser su questo elemento ottico senza utilizzare l'allestimento in camera di vuoto.

Lo specchio piano è stato realizzato in lega di alluminio e vincolato ad un banco ottico, il vibrometro laser è stato posto inclinato ad esso in direzione ortogonale ed è stato regolato in modo da misurare 20μm/V.

Lo specchio è stato scaldato mediante resistenze da una temperatura controllata di 20°C ad una finale di 30°C.

Il segnale in uscita dal vibrometro è stato acquisito tramite un computer, in modo da poter elaborare i dati ottenuti, che sono risultanti oscillanti intorno a diversi valori medi nel tempo. Per questo motivo i dati sono stati suddivisi in campioni dei quali sono stati valutati valore medio e deviazione standard. L'incertezza così determinata è stata applicata ai valori ottenuti come misura da 20°C a 30°C.

La traslazione dello specchio piano è stata valutata in un punto posto alla sua sommità (detto P1) ed in un altro posto all'altro estremo (detto P2) in modo da valutare anche la rotazione di tilt.

La traslazione del punto P1 è risultata di s_1=11,970±0,093μm, mentre la traslazione del punto P2 è risultata essere s_2=7,420±0,088μm.

Dalle analisi termo-elastiche iniziali sono risultate le traslazioni s_{1FEM}=11,644 e s_{2FEM}=7,494.

La rotazione di tilt risultante è pari a $\beta=10{,}862\cdot10^{-3}\pm3{,}056\cdot10^{-4}$°, mentre la rotazione determinata tramite le analisi termo-elastiche è pari a $\beta_{FEM}=9{,}869\cdot10^{-3}$°.

Le differenze tra traslazioni e rotazioni dello specchio calcolate mediante le analisi FEM e misurate sono: s_1=0,326μm, s_2=0,074μm e $\beta=9{,}930\cdot10^{-4}$°.

CONCLUSIONI

In questa tesi è stata studiata l'influenza delle variazioni di temperatura sulla performance ottica dello stereocamera che sarà coinvolta nella missione BepiColombo.

Considerando una temperatura iniziale pari a quella di integrazione dello strumento T_i=20°C, ed un range di temperatura operativa da T=-20°C a T=30°C, sono state eseguite le analisi-termoelastiche con un software ad elementi finiti (Nastran). I risultati sono stati elaborati in MATLAB per determinare le equazioni matematiche delle superfici deformate delle ottiche, che sono poi state imporate in ZEMAX per effettuare analisi raytrace atte a determinare le variazioni degli Spot Diagrams, della Diffraction Ensquare energy e delle curve MTF.

Sono state, inoltre, valutate le variazioni di focale, centro ottico dello strumento, spostamento dei pixel sul piano immagine e distorsione delle immagini per determinare l'incertezza sulla ricostruzione tridimensionale della superficie di Mercurio secondo le metologie GUM e Monte Carlo.

Contemporaneamente sono stati ideati dei vincoli cinematici da utilizzare al posto della colla per vincolare lenti e prismi in Fused Silica alla struttura in lega di Alluminio della stereocamera. I risultati mostrano la maggior efficienza di quest'ultimo tipo di vincolo, in particolare l'incertezza sulla profondità della superficie di Mercurio varia di 47,83m e di 1056,32m (a T=-20°C) considerando i primi ed i secondi rispettivamente.

Infine sono state valutate la traslazione e la rotazione dello specchio piano (M2) con l'ausilio di un vibrometro laser, variando la temperatura dell'elemento ottico da T=20°C a T=30°C.

BIBLIOGRAFIA

1. E. Flamini, F. Capaccioni, L. Colangeli, G. Cremonese, A. Doressoundiram, J.L. Josset, Y. Langevin, S. Debei, M.T. Capria, M.C. DeSanctis, L. Marinangeli , M. Massironi, E. Mazzotta Epifani, G. Naletto, P. Palumbo, P. Eng, J.F. Roig, A. Caporali, V. Da Deppo, S. Erard, C. Federico, O. Forni, M. Sgavetti, G. Filacchione, L. Giacomini, G. Marra, E. Martellato, M. Zusi, M. Cosi, C. Bettanini, L. Calamai, M. Zaccariotto, L. Tommasi, M. Dami, J. FicaiVeltroni, F. Poulet, Y. Hello and The SIMBIO-SYS Team, "SIMBIO-SYS:The spectrometer and imagers integrated observatory system for the BepiColombo planetary orbiter", Planet. Space Sci. 58, 125-143, 2010

2. V. Da Deppo, G. Naletto, G. Cremonese, S. Debei and E. Flamini, "A novel optical design for planetary surface stereo-imaging: preliminary design of the Stereoscopic Imaging Channel of SIMBIOSYS for the BepiColombo ESA mission", Proc. SPIE 6265 (2006)

3. S. Mattoccia, "Introduzione alla Visione Stereo", Università di Bologna, Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica (DEIS)

4. L. Colangeli, "The SIMBIO-SYS package on board the BepiColombo mission to Mercuri", La scienza italiana nella missione ESA/JAXA BepiColombo, 6/10/2008

5. BC-EST-RS-2523_Simbio-Sys_21-04-2008_1

6. BC-SIM-GAF-TN-005 rev2

7. BC-EST-RS-2523_Simbio-Sys_21-04-2008_2

8. http://sci.esa.int/

9. http://www.esa.int/esaCP/SEMGQ24MDAF_Italy_0.html

10. http://cisas.unipd.it/BepiColombo.php

11. http://it.wikipedia.org/wiki/BepiColombo

12. http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/p_mmo.html