

ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna

## Misure con sensori in fibra ottica

#### Francesco Falcetelli

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

#### Un breve riassunto della mia storia



#### Sommario

- 1. Introduzione sulle fibre ottiche
- 2. Strain transfer
- 3. Monitoraggio strutturale nei materiali compositi
- 4. Rilevamento di forma



#### Che cosa sono le fibre ottiche





Indice di rifrazione

$$n = \frac{c}{v}$$

<u>Materiale principale</u> Diossido di silicio (SiO<sub>2</sub>)

Diossido di germanio (GeO<sub>2</sub>) Allumina ( $Al_2O_3$ ) Anidride fosforica ( $P_2O_5$ )

#### <u>Agenti dopanti</u>

ſ

n





n

#### Fibre ottiche: struttura e dimensioni





#### Fibre ottiche: perdite





$$P_T = P_0 e^{-\alpha L}$$
$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_0}\right) = 4.343\alpha$$



#### Fibre ottiche: parametri di progetto



G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, Fifth edition. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2013.

<u>Relative core-cladding index difference</u>

$$\Delta = \frac{n_1 - n_c}{n_1}$$

<u>V parameter</u>



 $V < 2.405 \implies$  single-mode fiber



#### **Tipologie fibre ottiche**

#### **Polarization-maintaining fibers**

**Single-core fibers** 

Single-mode fibers

**Step index fibers** 

Multi-core fibers

**Graded index fibers** 

**Hollow-core fibers** 

**Photonic Crystal Fibers** 

Multi-mode fibers



#### **Classificazione fibre ottiche nell'ambito delle misure**

Single Point Sensors

P Interrogator Light Input Coating P. Light Transmitted Cladding Core-...... P+ Interferometric Grating-based FBG Fabry-Perot Fibre Bragg Grating (FBG) Light Reflected Mach-Zender Tilted FBG Chirped FBG Michelson  $\lambda_{\rm B}$ Falcetelli, F.; Martini, A.; Di Sante, R.; Troncossi, M. Strain Modal Testing with Fiber Bragg Gratings for Long-Period Gratings Sagnac Automotive Applications. Sensors 2022, 22, 946. https://doi.org/10.3390/s22030946  $\lambda_B = 2n_e\Lambda$ 

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon \qquad \qquad \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\alpha + \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)\Delta T$$

9

#### **Classificazione fibre ottiche nell'ambito delle misure**

Single Point Sensors

Interrogator Interrogator Grating-based Interferometric Multiplexing Fabry-Perot Fibre Bragg Grating (FBG) Tilted FBG Mach-Zender Michelson Chirped FBG Long-Period Gratings Sagnac

**Quasi-Distributed Sensors** 



10

### **Classificazione fibre ottiche nell'ambito delle misure**



Wavelength

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

#### **Strain Transfer: Introduzione**

Che cosa stiamo misurando?





## Strain transfer: modello matematico

$$\frac{d^2\varepsilon_f}{dx^2} - k^2\varepsilon_f = -k^2\varepsilon_s$$

$$k = \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha}{\pi r_f^2 E_f \left[\frac{1}{G_a} \ln \frac{t_a}{r_j} + \frac{1}{G_j} \ln \frac{r_j}{r_t} + \frac{1}{G_t} \ln \frac{r_t}{r_c} + \frac{1}{G_{oc}} \ln \frac{r_{oc}}{r_{ic}} + \frac{1}{G_{ic}} \ln \frac{r_{ic}}{r_f}\right]}$$

$$\varepsilon_f(x) = C_1 e^{-kx} + C_2 e^{kx} + \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_f(\pm L) = p\varepsilon_s$$

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_s \left[ 1 + (p-1) \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]$$



## **Strain transfer: case study**





### Strain transfer: modello numerico











#### **Strain transfer: setup sperimentale**



#### Strain transfer: risultati

Falcetelli, F.; Rossi, L.; Di Sante, R.; Bolognini, G. Strain Transfer in Surface-Bonded Optical Fiber Sensors. Sensors 2020, 20, 3100. https://doi.org/10.3390/s20113100

<sup>11</sup>Li et al. Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors. Opt.
Eng., 2006.
<sup>19</sup>Her et al. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors. Sensors, 2011



#### **Structural Health Monitoring**





Hamza Boukabache, Christophe Escriba and Jean-Yves Fourniols, "Toward Smart Aerospace Structures: Design of a Piezoelectric Sensor and Its Analog Interface for Flaw Detection," Sensors, vol. 14, p. 20543-20561, 2014



## **Probability of Detection**



MIL-HDBK-1823A, Department of Defense: Non-Destructive Evaluation (NDE) System, Reliability Assessment













22





23

	Static Testing	Static Testing	Fatigue Testing
Optical Fiber	Step Index Single Mode	Graded Index Multi-Mode	Step Index Single-Mode
Coating	ORMOCER <sup>®</sup>	Dual acrylate	ORMOCER®
Number of samples (n)	13	6	9
a <sub>90</sub>	4.93 mm	13.03 mm	5.88 mm
a <sub>90/95</sub>	5.56 mm	18.56 mm	7.82 mm
$\Delta = a_{90/95} - a_{90}$	0.63 mm	5.53 mm	1.94 mm

Falcetelli et al. Qualification of distributed optical fiber sensors using probability of detection curves for delamination in composite laminates. Structural Health Monitoring, 2022.



#### Rilevamento di forma con sensori in fibra ottica

#### Single-core fiber bundles



#### Multicore OFSs



Ma, X.; Sun, Z.; Luo, H.; Li, X. A Novel Fiber Optic Sensor for Microparticle Velocity Measurement Using Multicore Fiber. Appl. Sci. 2020, 10, 4829. https://doi.org/10.3390/app10144829



**Applicazioni per single-core fiber bundles** 

Single-core fiber bundles









#### **Applicazioni per fibre multicore**





Ignazio Floris, Jose M. Adam, Pedro A. Calderón, Salvador Sales, Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review, Optics and Lasers in Engineering, Volume 139, 2021, 106508, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106508

Kim, Sangbae et al., Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics Trends in Biotechnology, Volume 31, Issue 5, 287 - 294



#### Multicore OFSs



Ma, X.; Sun, Z.; Luo, H.; Li, X. A Novel Fiber Optic Sensor for Microparticle Velocity Measurement Using Multicore Fiber. Appl. Sci. 2020, 10, 4829. https://doi.org/10.3390/app10144829



#### Teoria del rilevamento di forma: calcolo di curvatura e angolo di flessione



$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_{long} + \kappa_x x + \kappa_y y$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon_i - \varepsilon_{long} - \kappa_x x - \kappa_y y)^2$$

$$\nabla SEE(\varepsilon_{long},\kappa_x,\kappa_y)=0$$

$$\kappa = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$$

 $\alpha = angle(\boldsymbol{\kappa})$ 



#### Teoria del rilevamento di forma: equazioni di Frenet-Serret



$$\mathbf{r}(s) = \mathbf{x}(s)\mathbf{i} + \mathbf{y}(s)\mathbf{j} + \mathbf{z}(s)\mathbf{k}$$

$$\tau(s) = \frac{d\alpha}{ds}$$

#### Equazioni di Frenet-Serret

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}'(s) \\ \mathbf{N}'(s) \\ \mathbf{B}'(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa(s) & 0 \\ -\kappa(s) & 0 & \tau(s) \\ 0 & -\tau(s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}(s) \\ \mathbf{N}(s) \\ \mathbf{B}(s) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{r}(s) = \int \boldsymbol{T}(s) \, ds + \boldsymbol{r_0}$$



#### Teoria del rilevamento di forma: flowchart





#### Test sperimentali preliminari: schema cavo





### Ricostruzione di un cerchio in un piano





## Tuning della distanza delle fibre dal centro del cavo







#### Sorgenti di incertezza





 $x_{i} \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_{xy}\right)$  $y_{i} \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_{xy}\right)$ 

#### Simulazione Monte Carlo





#### Effetto dell'errore di misura





#### Effetto della posizione dei cores



 $(\sigma_{\kappa}, \sigma_{\alpha}) \sim \frac{1}{\sqrt{n}}$ 



#### Propagazione incertezza nella curva 3D





### Core failure: effetto sulla curvatura (4 cores)







#### Core failure: effetto su angolo di flessione (4 cores)





#### Core failure: effetto sulla curvatura (5 cores)





### Core failure: effetto su angolo di flessione (5 cores)





#### Core failure: effetto sulla curva 3D



## Sviluppi futuri

1. Studio intrusività fibre ottiche in materiali compositi

2. Monitoraggio strutturale per lo storage di idrogeno in pressione

3. Sviluppo nuovi algoritmi per shape sensing con Al



N. Chandarana, D. Sanchez, C. Soutis, and M. Gresil, "Early Damage Detection in Composites during Fabrication and Mechanical Testing," Materials, vol. 10, no. 7, p. 685, Jun. 2017, doi: 10.3390/ma10070685.



Rivard, E.; Trudeau, M.; Zaghib, K. Hydrogen Storage for Mobility: A Review. Materials 2019, 12, 1973. https://doi.org/10.3390/ma12121 973







ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna

# Grazie per l'attenzione!

Francesco Falcetelli

Dipartimento di Ingegneria Industriale Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

francesco.falcetelli@unibo.it

www.unibo.it