

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οπτικός Σχεδιασμός και Κατασκευή ενός Οπτικού Συμβολόμετρου για τον Τρισδιάστατο Χαρακτηρισμό Επιφανειών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του Κατωπόδη Χρήστου

Επιβλέπουσα: Ζεργιώτη Ιωάννα, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οπτικός Σχεδιασμός και Κατασκευή ενός Οπτικού Συμβολόμετρου για τον Τρισδιάστατο Χαρακτηρισμό Επιφανειών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του Κατωπόδη Χρήστου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ζεργιώτη Ιωάννα	Ράπτης Ιωάννης	Παπάζογλου Δημήτριος Αναπληρωτής	
Καθηγήτρια ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ		
		Καθηγητής,	
		Πανεπιστήμιο Κρήτης	

©(2021) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρών μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η συγγραφή αυτής της διπλωματικής δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την συμβολή και την βοήθεια ορισμένων ανθρώπων που θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Ζεργιώτη Ιωάννα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρων αλλά και απαιτητικό ερευνητικό θέμα. Καθ' όλη την πορεία της διπλωματικής μου εργασίας η καθοδήγηση της με βοήθησαν να ανταπεξέλθω στις όποιες δυσκολίες παρουσιάστηκαν.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή, του Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Παπάζογλου Δημήτρη για τις πολύτιμες συμβουλές του και την γενικότερη καθοδήγησή του. Χωρίς αυτές η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής δεν θα ήταν εφικτή. Επίσης, τον Καθηγητή κ. Ράπτη Ιωάννη για την συνεισφορά του σε καίρια σημεία του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Από τις ευχαριστίες δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Θεοδωράκο Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθειά του στον σχεδιασμό και την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Σκοπός-Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο οπτικός σχεδιασμός και η κατασκευή ενός οπτικού συστήματος για την μέτρηση της τοπογραφίας μικροεπιφανειών με μεθόδους που βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής. Η παραπάνω διάταξη θα χρησιμοποιηθεί για την χαρτογράφηση μεταλλικών επιφανειών με μεγάλη ανακλαστικότητα.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι διάφορες μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό επιφανειών.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια θεωρητική περιγραφή του φαινομένου της συμβολής

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται ο οπτικός σχεδιασμός βασικών τύπων συμβολόμετρων.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται και μοντελοποιείται η προφιλομετρία με την χρήση συμβολόμετρων.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της ανάλυσης στο κεφάλαιο 4.

Contents

Εı	σαγι	ωγή		1-1
1	N	Λέθοδοι	ι χαρακτηρισμού επιφανειών	1-1
	1.1	Επε	μβατικές Μέθοδοι	1-1
	1	.1.1	Stylus Profilometry	1-1
	1.2	Mη	επεμβατικές Μέθοδοι	1-2
	1.2.1		Point Autofocus Instrument	1-2
	1.2.2		Μέθοδος Δομημένου φωτός (Structure Light method)	1-6
	1.2.3		Συμβολόμετρία (interferometry)	1-9
2	Θ)εωρητι	κό Υπόβαθρο	2-1
	2.1	Υπέ	ρθεση κυμάτων	2-1
	2.2	Συμ	φωνία (coherence) του φωτός	2-2
	2.2.1		Χρονική συμφωνία	2-2
	2.2.2		Χωρική συμφωνία	2-4
3	В	ασικοί τ	τύποι συμβολόμετρων	3-1
	3.1	Συμ	βολόμετρο Michelson (Michelson interferometer)	3-1
	3	.1.1	Εικόνες συμβολής στο συμβολόμετρο Michelson	3-3
	3.1.2 σχεδιασι		Σχεδιασμός ενός συμβολόμετρου Michelson στο πρόγραμμα οπτ ιού Zemax Optic Studio	ικού 3-4
	3.2	Συμ	βολόμετρο Twyman-Green	
	3	.2.1	Διάταξη Twyman-Green για την μέτρηση κοίλων επιφανειών	
4	П	Ιροφιλο	μετρία με τη χρήση συμβολόμετρων	4-1
	4.1	Στατ	τική Μέθοδος	4-1
	4	.1.1	Φιλτράρισμα στην στατική μέθοδο	4-2
	4.2	Pha	se-Shifting Interferometry (PSI)	4-2
	4	.2.1	Το πρόβλημα της εκδίπλωσης φάσης (phase unwrapping)	4-5
	4	.2.2	Σφάλματα στην μέθοδο PSI	4-14
	4	.2.3	Επιφανειακή ανάλυση	4-15
	4.3 20	Συμ	βολομετρία Σάρωσης Συμφωνίας (Coherence Scanning Interferom	etry CSI) 4-
	4	.3.1	Αρχή Λειτουργίας	4-20
	4	.3.2	Τυπική Διάταξη Συμβολομετρίας Σάρωσης Συνοχής	4-22
	4	.3.3	Αναμενόμενα Αποτελέσματα	4-23
5	П	Ιειραμα	τικό Μέρος	5-1
	5.1 Μέτρηση επιφάνειας με ένα step		5-1	
	5	.1.1	Μέτρηση της επιφάνειας του δείγματος με στατική μέθοδο	5-3

	5.1.2		Μέθοδος Phase shifting Interferometry	5-5		
	5.2 Phase-shifting interferometry προσομοίωση με MATLAB.		se-shifting interferometry προσομοίωση με MATLAB	5-8		
	5.2.1		Σύγκριση μεταξύ αλγορίθμων	5-16		
5.3 Συμπεράσματα		Συμ	περάσματα			
	5.4	Mɛ)	ιλοντικοί Στόχοι			
6	Ар	6-1				
	6.1 Τηλεσκόπια και μη-εστιακά (afocal) συστήματα			6-2		
	6.1	.1	Βασικοί τύποι τηλεσκοπίων	6-2		
	6.1.2 6.1.3		Τηλεσκόπιο του Γαλιλαίου (Galilean telescope)	6-2		
			Σχεδιασμός και ray tracing συστημάτων τηλεσκοπίων	6-3		
6.2 Kohler Illumination 6.3 Ανάλυση σε ένα οπ		Koh	ler Illumination	6-6		
		Ανά	λυση σε ένα οπτικού Συστήματος	6-10		
	6.4	MA	TLAB	6-11		
6.4.1 6.4.2 6.4.3 6.4.4 6.4.5		.1	Gaussian Distribution	6-11		
		.2	ITF	6-12		
		.3	WLSI interference signal	6-12		
		.4	Phase unwrapping method 1d	6-12		
		.5	Phase Unwrapping method 2D	6-13		
	6.4	.6	Phase Shifting Method Experimental	6-14		
7	Avo	Αναφορές				

Abstract

The thesis focuses on measuring the topography of flat surfaces with optical methods. Different approaches for 3D profiling of surfaces are presented with the main focus to lie on Interference methods. The interferometer setups are presented theoretically and designed using Zemax OpticStudio 21.1. Using MATLAB and Zemax OpticStudio interferometer results are modeled. The main experimental part of this thesis focuses on measuring the topography of a flat specimen, a glass with printed metal lines on it. Both static and dynamic interferometry methods were used for the 3D profiling.

List of Abbreviations

PAI: Point Autofocus Instruments OPD: Optical Path Difference OPL: Optical Path Length BS: Beam Splitter FWHM: Full Wdth at Half Maximum PSI: Phase Shifting Interferometry WLSI: White Light Scanning Interferometry CSI: Coherence Scanning Interferometry EFL: Effective Focal Length OTF: Optical Transfer Function MTF: Modulation Transfer Function ITF: Instrument Transfer Function

Εισαγωγή

1 Μέθοδοι χαρακτηρισμού επιφανειών.

Η μέτρηση και ο χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφανειών είναι σήμερα μια απαραίτητη μέθοδος τόσο σε επιστημονικούς όσο και σε βιομηχανικούς τομείς. Ειδικά στις σύγχρονες παραγωγικές διαδικασίες ο έλεγχος της μορφολογίας των υπό κατασκευή αντικειμένων απαιτείται να είναι ακριβής αλλά και συνεχής. Πρέπει να πραγματοποιείται πριν, κατά την διάρκεια και ύστερα από την κατασκευαστική διαδικασία ώστε να επιτυγχάνονται αποτελέσματα υψηλής ποιότητας. Μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων είναι αυτή την στιγμή διαθέσιμες για την χαρτογράφηση επιφανειών. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής.

Όλες οι τεχνικές προφιλομετρίας διακρίνονται σε 2 κατηγορίες σχετικά με την ύπαρξη ή όχι φυσικής επαφής μεταξύ της επιφάνειας και του συστήματος μέτρησης. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι οι επεμβατικές τεχνικές, ή τεχνικές επαφής (invasive/contact techniques) και οι μη-επεμβατικές τεχνικές (non-invasive techniques).

1.1 Επεμβατικές Μέθοδοι

Η πρώτη κατηγορία αφορά εφαρμογές όπου η επαφή του συστήματος με το υπό μέτρηση αντικείμενο, άρα και οι μικροδιαταραχές/καταστροφές που αυτή θα φέρει στην επιφάνεια, δεν θα επηρεάσουν την τελική του χρήση.

1.1.1 Stylus Profilometry

Η χαρτογράφηση επιφανειών με την χρήση του stylus είναι η πρώτη χρονικά μέθοδος προφιλομετρίας, και χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση επιφανειών για πάνω από 100 χρόνια. Το σύστημα χρησιμοποιεί μια ακίδα η οποία έρχεται σε επαφή με την υπό μέτρηση επιφάνεια. Σαρώνοντας την επιφάνεια με την ακίδα και μετρώντας τις αντιδράσεις της στα διάφορα ύψη της επιφάνειας είναι δυνατή η χαρτογράφηση της επιφάνειας του δείγματος.



Εικόνα 1-1 Stylus Profilometer [2]

Στην Εικόνα 1-1 φαίνεται ένα απλοποιούμενο σχήμα ενός stylus profilometer. Η τυπική διάμετρος στην άκρη της ακίδας είναι 50μm και συνήθως κατασκευάζεται από διαμάντι. Το μέγεθος αλλά και το σχήμα της ακίδας έχει άμεση επίδραση στην διακριτική ικανότητα του οργάνου. Ανάλογα με την εφαρμογή διάφορα σχήματα ακίδας χρησιμοποιούνται με το κωνικό να είναι το πιο ευρέως διαδομένο. Για την ανίχνευση των «αντιδράσεων» της ακίδας στον κάθετο με την επιφάνεια άξονα διάφοροι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς, αισθητήρες χωρητικότητας και οπτικοί αισθητήρες. Το οπτικό σύστημα στην Εικόνα 1-1 χρησιμοποιεί ένα σύστημα οπτικού μοχλού (optical lever) για να μετρήσει τις διαφοροποιήσεις στην επιφάνεια. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος που φαίνεται στην Εικόνα 1-2 είναι η εξής. Η μετακινούμενη βάση (translational stage) μεταφέρει το δείγμα δίνοντας την δυνατότητα στην ακίδα να σκανάρει όλη την επιφάνεια. Η ακίδα μένει συνεχώς σε επαφή με το δείγμα και καθώς αυτή αλλάζει θέση στον κάθετο άξονα περιστρέφει ένα pivot stage με ένα καθρέπτη πάνω σε αυτό. Ταυτόχρονα, μια δέσμη laser ανακλάται από τον καθρέπτη και ανιχνεύεται από έναν φωτο-αισθητήρα (position sensitive photodetector). Το σήμα του αισθητήρα ψηφιοποιείται και μετατρέπεται σε μια γραφική αναπαράσταση της επιφάνειας του δείγματος,

1.2 Μη επεμβατικές Μέθοδοι

1.2.1 Point Autofocus Instrument

Ένα σύστημα autofocus αποτελείται από ένα μικροσκόπιο autofocus και μια μετακινούμενη βάση στον xy άξονα. Η τεχνική είναι μη επεμβατική, το σύστημα μπορεί να μετρήσει το ύψος κάθε σημείου της επιφάνειας του δείγματος συγκεντρώνοντας σε κάθε σημείο την δέσμη μιας πηγής laser. Με την βοήθεια της μετακινούμενης βάσης η τοπογραφία ολόκληρου του δείγματος μπορεί να βρεθεί[4]. Για την μέτρηση του ύψους του δείγματος υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών που μπορούν να υλοποιηθούν, εδώ παρουσιάζονται οι 2 πιο βασικές, η μέθοδος beam offset και η ανίχνευση φάσης (phase detection)

1.2.1.1 Μέθοδος Beam Offset

Σε αυτήν την μέθοδοι μέτρησης μια δέσμη φωτός από μια πηγή laser διαθλάται από την μία πλευρά ενός αντικειμενικού φακού και συγκεντρώνεται στον οπτικό άξονα στην επιφάνεια του δείγματος. Η ανακλώμενη από την επιφάνεια δέσμη περνά από την άλλη πλευρά του αντικειμενικού και σχηματίζει την εικόνα του δείγματος πάνω σε έναν φωτο-αισθητήρα θέσης (Position Sensitive Detector PSD). Ο αντικειμενικός φακός βρίσκεται πάνω σε μια μηχανική πλατφόρμα με κίνηση στον z άξονα. Η πλατφόρμα είναι συνδεδεμένη με τον αισθητήρα φτιάχνοντας όλα μαζί τον μηχανισμό autofocus.



Εικόνα 1-2 Point Autofocus Instrument [3]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-3 αν η επιφάνεια του δείγματος βρίσκεται σε θέση τέτοια ώστε η εισερχόμενη δέσμη να συγκεντρώνεται πάνω της στον οπτικό άξονα τότε, η εξερχόμενη δέσμη θα συγκεντρωθεί επίσης πάνω στον οπτικό άξονα στον κέντρο του PSD. Σε αυτή την περίπτωση όλο το σύστημα είναι in-focus, άρα ο μηχανισμός δεν τίθεται σε λειτουργία



Εικόνα 1-3 Point autofocus instrument σε in-focus θέση [3]

Στην περίπτωση που η δέσμη δεν συγκεντρώνεται στον οπτικό άξονα ο μηχανισμός autofocus τίθεται σε λειτουργία μετατοπίζοντας τον αντικειμενικό φακό στον z άξονα εωσότου η δέσμη να συγκεντρωθεί στο κέντρο του PSD. Η διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 1-4



Εικόνα 1-4 Μηχανισμός Autofocus [3]

Η απόσταση w σχετίζεται άμεσα με την μετατόπιση του αντικειμενικού στον z άξονα (Z2) και κατά συνέπεια με το ύψος του δείγματος (Z1).

1.2.1.2 Μέθοδος ανίχνευσης φάσης

Η δεύτερη μέθοδος που θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική είναι η μέθοδος εύρεσης φάσης (phase detection method). Τα συστήματα autofocus πέρα από την χρήση τους για χαρτογράφηση επιφανειών υπάρχουν και σαν μέρη άλλων οπτικών συστημάτων απεικόνισης. Χαρακτηριστικά τέτοια παραδείγματα είναι τα μικροσκόπια και οι φωτογραφικές μηχανές. Εδώ τα Point Autofocus Instruments ρυθμίζουν τις θέσεις των αντικειμενικών φακών ώστε να είναι το αντικείμενο πάντα in focus χωρίς να πρέπει ο χρήστης να ρυθμίζει την απόσταση με κάθε διαφορετική χρήση. Η μέθοδος phase detection είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη για το autofocus φωτογραφικών μηχανών είτε πρόκειται για DSLR είτε για φωτογραφικές σε κινητά τηλέφωνα. Και σε εφαρμογές μικροσκοπίων όμως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται επί το πλείστον.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας αυτής της μεθόδου. Εδώ το βασικό επιπλέων στοιχείο είναι η χρήση μιας μάσκας με 2 pinholes πριν την κάμερα. Η μάσκα τοποθετείται στο exit pupil του συστήματος για να περιορίσει το φως από το δείγμα. Αν όλο το σύστημα είναι in focus τότε μια εικόνα θα καταγραφεί στον αισθητήρα της κάμερας, σε αντίθετη περίπτωση θα προκύψουν δύο. Οι δύο εικόνες θα είναι μετατοπισμένες χωρικά ανάλογα με το μέγεθος του defocus. Τα 2 αυτά μεγέθη (defocus και χωρική απόσταση μεταξύ των 2 εικόνων) μπορούν να συσχετισθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κάποια autocorrelation ανάλυση.



Εικόνα 1-5 Σύστημα Point Autofocus που βασίζεται στην μέθοδο ανίχνευσης φάσης. [4]

Στην εικόνα 1-5 φαίνεται ένα σύστημα autofocus τοποθετημένο πάνω στην διάταξη ενός μικροσκοπίου. Το σύστημα autofocusing αποτελεί όλη η δεξιά «διακλάδωση» του σχήματος. Σε αυτή πέρα από την μάσκα και τον αισθητήρα του autofocusing, υπάρχουν ακόμη 2 στοιχεία, ένας φακός πριν την κάμερα για την απεικόνιση (imaging lens) και ένα σύστημα relay. Το τελευταίο χρησιμοποιείται για την μεταφορά της εικόνας του δείγματος πάνω στην μάσκα. Μια τυπική εικόνα ενός τέτοιου συστήματος όταν η επιφάνειά του δείγματος είναι out of focus φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 1-6.



Εικόνα 1-6 Τυπική εικόνα μιας διάταξης autofocus βασίζεται στην μέθοδο ανίχνευσης φάσης.[4]

Εδώ μπορούμε να δούμε τις 2 ίδιες εικόνες και την σχετική τους απόσταση x_0 οποία μπορεί να βρεθεί με autocorrelation μεθόδους. Τα αποτελέσματα μιας τέτοια μεθόδου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 1-7 Συσχέτιση των αποτελεσμάτων της εικόνας 6 με το ύψος της επιφάνειας του δείγματος[4]

1.2.2 Μέθοδος Δομημένου φωτός (Structure Light method)

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην προβολή ενός grating πάνω στην επιφάνεια. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια από τις πιο χρησιμοποιημένες στην σάρωση τρισδιάστατων επιφανειών. Η ακρίβεια και η ταχύτητα σάρωσης της συγκεκριμένης μεθόδου την έχουν καθιερώσει σε διαφορετικούς τομείς όπως στον ποιοτικό έλεγχο, σε βιο-ιατρικές εφαρμογές, και στο machine vision.

Στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί η μέθοδος Moire για την μέτρηση επιφανειών. Η τεχνική Moire βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο που προκύπτει όταν 2 πλέγματα (gratings) τοποθετηθούν το ένα πάνω από το άλλο. Τότε δημιουργείται ένα «μηχανικό» μοτίβο συμβολής. Ο αδόκιμος όρος μηχανικό μοτίβο συμβολής χρησιμοποιείται για να την ξεχωρίσει από την συμβολή λόγο της κυματικής φύσης του φωτός. Για να παρατηρηθεί το μοτίβο τα 2 gratings πρέπει να έχουν μια σχετική

μετατόπιση, χωρική περιστροφής ή να έχουν μια διαφορά στην χωρική τους συχνότητα. Μια μέθοδο συμβολής Moire φαίνεται στο σχήμα 8.



Εικόνα 1-8 Μοτίβα Moire [5]

Η χρήση ενός grating αναφοράς πάνω από την επιφάνεια και η χρήση κατάλληλων αναλυτικών μεθόδων μπορεί να μας δώσει πληροφορία για τα ύψη της επιφάνειας.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε ένα Moire μοτίβο σκίασης που δημιουργείται από την υπερκάλυψη ενός grating αναφοράς και της σκιάς του πάνω στο αντικείμενο. Στην εικόνα 9 βλέπουμε μια τέτοια διάταξη. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια γεωμετρική ανάλυση της μεθόδου.



Εικόνα 1-9 Γεωμετρική ανάλυση μεθόδου Shadow Moire [6]

Στο σχήμα φαίνονται μια σημειακή πηγή και ένας αισθητήρας σε απόσταση l από ένα grating αναφοράς με χωρική περίοδο p. Η πηγή και ο αισθητήρας απέχουν s. To grating τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε το σημείο του O να εφάπτεται με την επιφάνεια του αντικείμενο. Αυτό το σημείο θα θεωρηθεί η αρχή των αξόνων στο διάγραμμα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1-9 το grating φωτίζεται από την σημειακή πηγή και η σκιά του προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια. Ο αισθητήρας της κάμερας θα παρατηρήσει την υπερκάλυψη των 2 grating, και την δημιουργία ενός μοτίβου Moire. Το πρώτο grating περιλαμβάνει τα στοιχεία OB και το δεύτερο τα OP, που είναι η σκιά των στοιχείων OA του grating αναφοράς. Υποθέτουμε ότι τα OA και OB έχουν i και j στοιχεία αντίστοιχα. Έτσι για το AB έχουμε

$$AB = OB - OA = jp - np$$
$$= 0,1,2,3$$

Από το σχήμα τώρα έχουμε

 $AB = h_n(tan\alpha + tan\beta)$

п

Όπου,

n: είναι η τάξη της του κροσσού συμβολής Moire

h_n: Το βάθος (ύψος) της επιφάνειας του δείγματος στο σημείο P για το n-ιοστό κροσσό (στο σχήμα βλέπουμε την γραμμή 6ⁿ τάξης)



Εικόνα 1-10 Κροσσοί Moire μιας κυρτής επιφάνειας [7]

Άρα,

$$h_n = \frac{np}{tan\alpha + tan\beta}$$

Και

$$tan\alpha = \frac{x_p}{l + h_n}$$
$$tan\beta = \frac{s - x_p}{l + h_n}$$
$$h_n = \frac{npl}{s - np}$$

Από την προηγούμενη εξίσωση συμπεραίνουμε ότι οι κροσσοί Moire είναι ισοϋψής γραμμές (contour lines). Γνωρίζοντας λοιπόν την τάξη μια γραμμής μπορούμε, προσεγγιστικά, να βγάλουμε συμπέρασμα για το βάθος της επιφάνειας σε σχέση με την θέση του grating αναφοράς.

Για την πιο ακριβή μέτρηση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας απαιτείται η ανάλυση της έντασης της συμβολής.

1.2.3 Συμβολόμετρία (interferometry)

Η συμβολομετρία είναι η τεχνική της ανάλυσης 2 ή περισσότερων κυμάτων μελετώντας το μοτίβο της συμβολής που προκύπτει από την υπέρθεσή τους. Το όργανο που χρησιμοποιείται για την τεχνική αυτή ονομάζεται συμβολόμετρο. Η συμβολομετρία είναι μια ακόμη μη επεμβατική μέθοδος για τον χαρακτηρισμό επιφανειών.Η ταχύτητα αλλά και η ακρίβεια της, που μπορεί να φτάσει το 1nm ανεξαρτήτως του οπτικού πεδίου, την έχουν καθιερώσει σαν την βασικότερη μέθοδο για την τοπογραφία επιφανειών με μεγάλη ακρίβεια.

Οι δύο βασικότερες τεχνικές συμβολομετρίας είναι η μέθοδος μεταβολής φάσης, Phase Shifting Interferometry (PSI) και η μέθοδος σάρωσης λευκού φωτός, Wight Light Scanning Interferometry (WLSI). Η αρχή λειτουργίας και της συμβολομετρίας βασίζεται στην υπέρθεση πάνω σε έναν αισθητήρα 2 κυματικών μετώπων. Το ένα θα έχει ανακλαστεί από την επιφάνεια του αντικειμένου ενώ το δεύτερο από μια επιφάνεια αναφοράς που συνήθως είναι ένας καθρέπτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα και οι 2 παραπάνω μέθοδοι.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.

2.1 Υπέρθεση κυμάτων

Η αρχή της υπέρθεσης αναφέρει ότι όταν 2 ή περισσότερα κύματα επικαλύπτονται στον χώρο, τότε η τελική διαταραχή του μέσου στο οποίο διαδίδονται τα κύματα θα ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα τους σε κάθε σημείο του χώρου. Έστω δύο κύματα τα οποία φθάνουν σε φάση σε ένα σημείο στο χώρο. Αν υποθέσουμε ότι σε αυτό το σημείο το ένα κύμα παρουσιάζει μέγιστο τότε το ίδιο θα ισχύει και για το άλλο. Το αποτέλεσμα της υπέρθεσής (ή συμβολής) τους λοιπόν θα είναι ένα νέο κύμα με πλάτος όσο το άθροισμα των δυο αρχικών. Αν τα δυο αρχικά κύματα είναι ίδια τότε το νέο θα έχει πλάτος διπλάσιο από τα 2 αρχικά. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε ενισχυτική συμβολή.



Εικόνα 2-1 Ενισχυτική Συμβολή

Στην περίπτωση τώρα που τα 2 κύματα έχουν μια διαφορά φάσης 180° τότε αν σε ένα σημείο στον χώρο το ένα κύμα παρουσιάζει θετικό μέγιστο τότε το άλλο θα παρουσιάζει αρνητικό. Η υπέρθεση τους λοιπόν θα είναι ένα κύμα με πλάτος την διαφορά των δυο αρχικών. Ειδικά όταν τα δυο αρχικά κύματα έχουν ίδιο πλάτος μεταξύ τους τότε το καινούργιο κύμα έχει μηδενικό πλάτος. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι έχουμε καταστρεπτική συμβολή.



Εικόνα 2-2 Καταστρεπτική συμβολή

Η βασικότερη μορφή συμβολής είναι η συμβολή 2 κυμάτων (two-beam interference). Η εξίσωση που περιγράφει την συμβολή 2 ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συγκεκριμένα, δίνεται από την παρακάτω έκφραση

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$
$$I(x, y) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Όπου

Α: το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου.

Ι: ένταση της ακτινοβολίας για την οποία ισχύει $I = A^2$

 $\varphi_{1,2}$: Οι αντίστοιχες φάσεις για τα 2 κύματα

Η συμβολή 2 κυμάτων πάνω σε μια οθόνη όπως περιγράφεται από την παραπάνω εξίσωση έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία σκοτεινών και φωτεινών ζωνών οι οποίες είναι αποτέλεσμα ενισχυτικής και καταστρεπτικής συμβολής. Οι ζώνες αυτές ονομάζονται κροσσοί συμβολής.

Για να είναι ορατές οι παραπάνω ζώνες πρέπει να ικανοποιούνται κάποιες βασικές συνθήκες. Τα 2 κύματα πρέπει να είναι χρονικά και χωρικά σύμφωνα μεταξύ τους. Επίσης, η πόλωση των 2 κυμάτων πρέπει να είναι κοινή καθώς και οι εντάσεις τους να είναι αρκετά κοντά.

2.2 Συμφωνία (coherence) του φωτός

Η συμφωνία του φωτός είναι ένα μέτρο της σχέσης μεταξύ των φάσεων σε διαφορετικά χρονικά και χωρικά σημεία σε ένα κύμα.

2.2.1 Χρονική συμφωνία

Είναι ένα μέτρο της συσχέτισης της φάσης του φωτός σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσής του. Η χωρική συμφωνία είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους φάσματος της πηγής των 2 κυμάτων που συμβάλουν. Πιο συγκεκριμένα είναι ανάλογη με τον μετασχηματισμό Fourier της φασματικής κατανομής της πηγής. Υποθέτοντας μια πηγή με το παρακάτω φάσμα ορίζουμε

 λ_0 : Το κεντρικό μήκος κύματος που εκπέμπει η πηγή και

Δλ: Το φασματικό εύρος ζώνης που ορίζεται στο μέγιστο πλάτος στο μισό του μεγίστου, Full Width at Half Maximum (FWHM), της κατανομής.



Εικόνα 2-3 Τυπικό φάσμα εκπομπής μιας μονοχρωματικής πηγής

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του παραπάνω θα μας δώσει ένα αρμονικό κύμα της μορφής



Εικόνα 2-4 Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του φάσματος εκπομπής μιας πραγματικής μονοχρωματικής πηγής.

Στην εικόνα 2-4 βλέπουμε την κυματομορφή μιας μη ιδανικής μονοχρωματικής πηγής. Διάφορες συχνότητές είναι παρούσες στην συγκεκριμένη μορφή, αφού η πηγή έχει ένα εύρος Δλ στα μήκη κύματος που εκπέμπει. Η μέση τιμή των διάφορων χρόνων τ_i είναι το t_c.

Επίσης, L_0 ή L_c είναι το μήκος συμφωνίας της πηγής coherence length και αντίστοιχα t_0 ή t_c ο χρόνος συμφωνίας. Τα δύο μεγέθη σχετίζονται με τον εξής τρόπο

$$t_c = \frac{L_c}{c}$$

Οι ποσότητες Δλ και L_c είναι αντιστρόφως ανάλογες. $L_c = \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda}$

Έτσι για μια ιδανική μονοχρωματική (Δλ=0) το L_c θα τείνει στο άπειρο.

Πρακτικά το μήκος συμφωνίας μιας πηγής δείχνει την διαφορά οπτικού δρόμου που μπορούν να έχουν 2 δέσμες ώστε να υπάρξει συμβολή μεταξύ τους. Συνεπώς 2 δέσμες που προκύπτουν από μια μονοχρωματική πηγή μπορούν να συμβάλουν μεταξύ τους όση σχετική καθυστέρηση κι αν έχουν.

2.2.2 Χωρική συμφωνία

Είναι ένα μέτρο της συσχέτισης του φωτός σε διαφορετικά σημεία κάθετα στην διεύθυνση διάδοσής του και μας δείχνει πόσο ομοιογενής είναι η φάση του κυματικού μετώπου (wavefront).

Για να είναι εμφανής η συμβολή μεταξύ 2 κυμάτων, οι δέσμες πρέπει να είναι χωρικά σύμφωνες. Στην περίπτωση ιδανικών σημειακών πηγών οποιαδήποτε σημείο μιας δέσμης μπορεί να συμβάλει με οποιοδήποτε μιας άλλης. Αντίθετα, μια πραγματική πηγή μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα σύνολο ιδανικών σημειακών πηγών, όσο μεγαλύτερη είναι η πηγή τόσο μικραίνει και η περιοχή χωρικής της συμφωνίας, A_c , η οποία δίνεται από την σχέση $A_c = \frac{D^2 \lambda^2}{\pi d^2}$

d: Η διάμετρος της πηγής

D: Η απόσταση από την πηγή

Όπως είναι φανερό το κυματικό μέτωπο τείνει να εξομαλύνεται καθώς απομακρύνεται από την πηγή.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε κάποιες βασικές μορφές κυματικού μετώπου ανάλογα με το είδος της συμφωνίας.



Εικόνα 2-5 Πηγή με χωρική και χρονική συμφωνία [8]



Εικόνα 2-6 Πηγή με χωρική συμφωνία και χρονική ασυμφωνία [8]



Εικόνα 2-7 Πηγή με χωρική ασυμφωνία και χρονική συμφωνία [8]

3 Βασικοί τύποι συμβολόμετρων

3.1 Συμβολόμετρο Michelson (Michelson interferometer) Στην Εικόνα 3-1 βλέπουμε την διάταξη του συμβολόμετρου Michelson.



Εικόνα 3-1 Συμβολόμετρο Michelson (design και προσομοίωση 3DOPTIX)

Όπου,

S η πηγή laser

 M_1 και M_2 καθρέπτες

BS: Beam splitter

Στην διάταξη αυτή η δέσμη από την πηγή laser σπάει σε 2 νέες, ίδιες μεταξύ τους, δέσμες από τον beam splitter. Η πρώτη διαπερνά τον beam splitter ενώ η δεύτερη ανακλάται από αυτόν σε γωνία 90°. Στην συνέχεια οι 2 δέσμες αφού ανακλαστούν από τους αντίστοιχους καθρέπτες περνούν και πάλι από τον beam splitter και επανενώνονται με αποτέλεσμα την συμβολή τους πάνω στην οθόνη.



Εικόνα 3-2 Πειραματική Διάταξη Michelson

Η διαφορά οπτικού δρόμου (OPD) ισούται με την διπλάσια απόσταση της διαφοράς των 2 βραχιόνων του συμβολόμετρου OPD=2($L_1 - L_2$). Αλλάζοντας συνεπώς τις θέσεις των καθρεπτών μπορούμε να μεταβάλουμε την διαφορά οπτικού δρόμου. Όπως είδαμε, αν ως πηγή χρησιμοποιήσουμε ένα μονοχρωματικό laser η διαφορά οπτικού δρόμου, δηλαδή η καθυστέρηση που πρέπει έχει η μια δέσμη σε σχέση με την άλλη, ώστε να δούμε συμβολή είναι αρκετά μεγάλη ώστε πρακτικά να βλέπουμε συμβολή σε οποιοδήποτε σχετικό μήκος των βραχιόνων.

Για να επιτευχθεί ενισχυτική συμβολή πρέπει η διαφορά οπτικού δρόμου να ισούται με έναν ακέραιο αριθμό μηκών κύματος, mλ. Άρα αν ξεκινήσουμε από μηδενικό OPD και μετακινήσουμε τον ένα καθρέπτη κατά μία απόσταση ΔL η διαφορά οπτικού δρόμου θα είναι ΔL/2. Συνεπώς η ενισχυτική συμβολή επιτυγχάνεται όταν

$$OPD = m\lambda$$

Όμως,

$$OPD = \frac{\Delta L}{2}$$

Αν μετακινήσουμε τον ένα καθρέπτη κατά $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$, οι κροσσοί της συμβολής θα μετακινηθούν κατά λ. Συνεπώς, καθώς ο ένας καθρέπτης μετακινείται οι κροσσοί αλλάζουν θέσεις συνεχώς, μετρώντας τον αριθμό των κροσσών που περνάνε από ένα τυχαίο σημείο της εικόνας ένας παρατηρητής μπορεί να υπολογίσει πολύ μικρές μεταβολές.

Αντίστοιχα, η καταστρεπτική συμβολή θα συμβαίνει για $OPD = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$

3.1.1 Εικόνες συμβολής στο συμβολόμετρο Michelson

Σε μια διάταξη Michelson μπορούν να παρατηρηθούν διάφορα μοτίβα συμβολής ανάλογα με την σχετική κλίση των 2 καθρεπτών, στην συνέχεια θα δούμε την διαδικασία σχηματισμών διάφορων εικόνων συμβολής μέσα από ένα γεωμετρικό ray tracing του συμβολόμετρου Michelson.

Στην Εικόνα 3-3 ορίζουμε σαν M'_2 την εικόνα του καθρέπτη M_2 πάνω στον βραχίονα 1. Οι μη-πραγματικές εικόνες της πηγής από τους 2 καθρέπτες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Αν d είναι η απόσταση M_1 και M'_2 δηλαδή η διαφορά των μηκών των 2 βραχιόνων, τότε αντίστοιχη απόσταση που θα έχουν και οι εικόνες της πηγής θα είναι 2d.



Εικόνα 3-3 Γεμετρικό ray-tracing σε Σύστημα Michelson

Η διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ των σημείων Ρ' και Ρ'' είναι 2dcosθ. Ενισχυτική συμβολή (φωτεινό fringe) θα συμβεί όταν 2dcosθ=nλ. Για συγκεκριμένες τιμές n,λ και d το θ είναι ουσιαστικά μια σταθερά άρα το μοτίβο των fringes είναι κυκλικό.



Εικόνα 3-4 Σύστημα Michelson διαφορά οπτικού δρόμου των εικόνων από τους 2 καθρέπτες [18]

Τώρα, θα εξετάσουμε την περίπτωση που οι 2 καθρέπτες έχουν μια σχετική κλίση μεταξύ τους, το ίδιο φυσικά θα ισχύει και για τα M_1 και M'_2 δηλαδή τον πρώτο καθρέπτη και την εικόνα του δευτέρου.



Εικόνα 3-5 [18]

Σε αυτή την περίπτωση το στρώμα αέρα μεταξύ των 2 εικόνων της πηγής παίρνει τη παραπάνω μορφή την οποία ακολουθεί και το μοτίβο της συμβολής.

Τέλος στην περίπτωση που η εικόνα του καθρέπτη M_2 τέμνει τον καθρέπτη M_1 το μοτίβο της συμβολής θα είναι ευθείες γραμμές.



Εικόνα 3-6 [18]

3.1.2 Σχεδιασμός ενός συμβολόμετρου Michelson στο πρόγραμμα οπτικού σχεδιασμού Zemax Optic Studio

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχεδίαση ενός συμβολόμετρου Michelson στο optic studio του Zemax. Ο σχεδιασμός έγινε χρησιμοποιώντας το sequential mode του Zemax. Για αυτό το design όπου έχουμε 2 δέσμες απαιτείται η χρήση multiple configurations στο zemax. Το πρώτο configuration θα ακολουθεί την δέσμη η οποία θα διαπεράσει τον Beam splitter και θα ανακλαστεί στον πρώτο καθρέπτη ενώ το δεύτερο configuration θα περιγράψει την δέσμη που θα ανακλαστεί σε γωνία 90° από τον beam splitter.



Εικόνα 3-7 Συμβολόμετρο Michelson, Zemax Design με multiconfiguration στο sequential mode, Zemax OpticStudio 21.1.2

Για να δούμε την συμβολή στο zemax χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο εργαλείο που παρουσιάζει την εικόνα συμβολής των 2 configurations. Παρακάτω παρουσιάζεται η συμβολή που όπως αναμένονταν έχει κυκλικό μοτίβο.



Εικόνα 3-8 Εικόνα συμβολής χωρίς κλίση στους 2 καθρέπτες Zemax OpticStudio 21.1.2

Εφαρμόζοντας μια κλίση 5⁰ στον x άξονα σε έναν από τους 2 καθρέπτες βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα ότι το μοτίβο της συμβολής παίρνει αυτό το παραβολοειδές σχήμα.



Εικόνα 3-9 Εικόνα συμβολής με κλίση 5⁰ στον x άξονα Zemax OpticStudio 21.1.2

Αντίστοιχα παρουσιάζεται και η συμβολή όταν έχουμε κλίση 5° στον y άξονες και όταν έχει εφαρμοστεί κλίση 5° και στους 2 άξονες.



Εικόνα 3-10 Εικόνα συμβολής με κλίση 50 στον y άξονα Zemax OpticStudio 21.1.2



Εικόνα 3-11 Εικόνα συμβολής με κλίση 5 και στους 2 άξονες Zemax OpticStudio 21.1.2

Η κλίση του μοτίβου της συμβολής ακολουθεί την κλίση του καθρέπτη.

Τέλος, εφαρμόζοντας κατάλληλη κλίση στους καθρέπτες βλέπουμε την περίπτωση δημιουργίας pattern συμβολής που αποτελείται από ευθείες γραμμές.



Εικόνα 3-12 Εικόνα Συμβολής Zemax OpticStudio 21.1.2

Ένα ακόμη design ενός συμβολόμετρου Michelson φαίνεται παρακάτω. Εδώ προσομοιώθηκε μια σημειακή πηγή. Για να παραληλλοποιειθεί η δέσμη χρησιμοποιήθηκε ένας condenser φακός.



Εικόνα 3-13 Συμβολόμετρο Michelson, zemax shaded model, Zemax OpticStudio 21.1.2



Εικόνα 3-14 OPD=2, Zemax OpticStudio 21.1.2



Εικόνα 3-15 OPD=8, Zemax OpticStudio 21.1.2

Στην Εικόνα 3-14 και στην Εικόνα 3-15 βλέπουμε τους κροσσούς συμβολής για 2 διαφορετικές θέσεις του ενός καθρέπτη, άρα για 2 διαφορετικά OPDs.

Τα συμβολόμετρα 2 δεσμών, όπως και η διάταξη Michelson που αναλύθηκε προηγουμένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό της τοπολογίας επιφανειών τόσο επίπεδων όσο και καμπύλων. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην συμβολή 2 κυματικών μετώπων. Ενός επίπεδου μετώπου αναφοράς (reference wavefront) που θα προκύψει από έναν καθρέπτη, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, και ενός που θα προκύψει από το δείγμα που θέλουμε να μετρήσουμε. Το δεύτερο wavefront θα έχει παρεκκλίσεις από το επίπεδο κύμα οι οποίες φέρουν πληροφορίες για την μορφολογία ου υλικού.

3.2 Συμβολόμετρο Twyman-Green

Ο βασικότερος τύπος συμβολομέτρου που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό επιφανειών είναι το συμβολόμετρο Twyman-green. Το συμβολόμετρο twyman-green είναι ουσιαστικά μια μετατροπή του συμβολόμετρου Michelson στο οποίο έχει προστεθεί ένας φακός στον αρμό που βρίσκεται το υπό εξέταση δείγμα.

Χρησιμοποιώντας και πάλι το software οπτικής σχεδίασης zemax optic studio σχεδιάστηκε ένα απλό συμβολόμετρο Twyman-green.


Εικόνα 3-16 Συμβολόμετρο Twyman-Green, Zemax design με τη χρήση multiconfiguration στο sequential mode, Zemax OpticStudio 21.1.2

Στην Εικόνα 3-16 που παρουσιάζει το τελικό σχέδιο στο zemax, οι μπλε δέσμες αντιστοιχούν στο 1° configuration ενώ οι πράσινες στο 2°. Το δείγμα δέχεται την δέσμη από το πρώτο configuration και όπως φαίνεται περιέχει και έναν φακό ο οποίος έχει διπλό ρόλο ανάλογα με το είδος του δείγματος που μελετάται. Αν, όπως στην περίπτωση της Εικόνα 3-16, το δείγμα είναι επίπεδο χρησιμοποιείται για να έχουμε ένα ελεγχόμενο μέγεθος στο spot και άρα να μπορούμε να μετρήσουμε ένα ακριβές κομμάτι πάνω στο δείγμα. Ο φακός είναι biconvex εστιακής απόστασης 60 mm και τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το υπό μελέτη υλικό να βρίσκεται πάνω στην εστιακή απόσταση του. Έτσι οι ακτίνες που ανακλώνται από τον καθρέπτη επιστρέφουν παραλληλοποιημένες collimated στον beam splitter.

Στην Εικόνα 3-17 βλέπουμε το pattern της συμβολής από την παραπάνω διάταξη.



Εικόνα 3-17 Εικόνα συμβολής διάταξης Twyman-Green, Zemax OpticStudio 21.1.2

Στην περίπτωση που η υπό μελέτη επιφάνεια δεν είναι εντελώς επίπεδη αλλά έχει κάποια μορφολογία στην επιφάνειά της το κυματικό μέτωπο που θα προκύψει αφού συμβάλει με το επίπεδο κυματικό μέτωπο αναφοράς θα μας δώσει πληροφορία για την συγκεκριμένη μορφολογία.

3.2.1 Διάταξη Twyman-Green για την μέτρηση κοίλων επιφανειών

Στη συνέχεια με την βοήθεια του optic studio του Zemax σχεδιάστηκε ένα συμβολόμετρο Twyman-Green για την υπολογισμό της καμπυλότητας κοίλων επιφανειών. Όπως φαίνεται, εδώ ο φακός χρησιμοποιείται για την μετατροπή του κυματικού μετώπου από επίπεδο σε σφαιρικό. Αν η καμπυλότητα του μετώπου συμπίπτει με αυτή του υπο εξέταση υλικού τότε οι ακτίνες αφού ανακλαστούν από την επιφάνεια θα εξέλθουν από τον φακό collimated συνεπώς θα μπορέσουν να συμβάλουν με το κυματικό μέτωπο αναφοράς από τον καθρέπτη.



Εικόνα 3-18 Οπτικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί στον ένα βραχίονα του συμβολόμετρου, Zemax OpticStudio 21.1.2

Στο παραπάνω σχέδιο βασίζεται η λειτουργία του φακού σε συνδυασμό με την κοίλη ανακλαστική επιφάνεια για να προκύψουν collimated δέσμες κατά την έξοδο από τον φακό. Για να επιτευχθεί αυτό, η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας ανάκλασης υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το solve του zemax "marginal ray normal". Με αυτόν τον τρόπο οι ακτίνες διασταυρώνονται κάθετα με την επιφάνεια συνεπώς επιστρέφουν από τον ίδιο δρόμο που ήρθαν. Καταλήγουν δηλαδή σε παραλληλία όπως ακριβώς ήρθαν από την πηγή. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας planoconvex με εστιακή απόσταση 38,5 mm.Η ίδια ακριβώς διάταξη χρησιμοποιήθηκε και στον αντίστοιχο βραχίονα του συμβολόμετρου Twyman-green που σχεδιάστηκε.







Εικόνα 3-20 Εικόνα συμβολής, Zemax OpticStudio 21.1.2

Σε αυτή την περίπτωση, όπου η καμπυλότητα του δείγματος είναι ίδια με αυτή του κυματικού μετώπου, δημιουργούνται κροσσοί συμβολής.

Συνεπώς, κροσσοί συμβολής θα παρατηρηθούν μόνο όταν το δείγμα βρίσκεται στην κατάλληλη απόσταση από τον φακό για να συμβεί αυτό. Η διαδικασία για να εκτιμηθεί η καμπυλότητα του δείγματος είναι η εξής. Αρχικά θα μετακινηθεί το δείγμα πάνω στον άξονα του βραχίονα μέχρι στον ανιχνευτή (κάμερα) να παρουσιασθούν οι κροσσοί συμβολής, όπως φαίνονται στην Εικόνα 3-20. Σε όλες τις άλλες θέσεις δεν θα βλέπουμε συμβολή. Στην Εικόνα 3-21 από το zemax βλέπουμε ότι όντως δεν υπάρχει συμβολή σε αυτή την περίπτωση



Εικόνα 3-21 Interferogram από το zemax, Zemax OpticStudio 21.1.2

Στη συνέχεια αφού έχουμε εντοπίσει την θέση και πάλι μέσω του Zemax OpticStudio υπολογίζουμε την καμπυλότητα του δείγματος χρησιμοποιώντας το solve normal marginal ray για την συγκεκριμένη απόσταση.

4 Προφιλομετρία με τη χρήση συμβολόμετρων

4.1 Στατική Μέθοδος

Η απλούστερη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό επιφανειών βασίζεται στην χρήση ενός από τα συμβολόμετρα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέθοδος βασίζεται στην μεταβολή της διαφοράς οπτικού δρόμου (OPD) ανάλογα με το ύψος κάθε περιοχής του δείγματος. Η διαφορά στο OPD σε κάθε σημείο του δείγματος μεταφράζεται σε κροσσούς σε διαφορετική θέση.

Παρακάτω βλέπουμε ένα απλό σχέδιο που παρουσιάζει την παραπάνω διαδικασία. Στην πρώτη εικόνα βλέπουμε την επιφάνεια ενός δείγματος το οποίο έχει ένα σκαλοπάτι. Αν τοποθετηθεί το συγκεκριμένο δείγμα στον ένα βραχίονα ενός συμβολόμετρου από τα οποία περιεγράφηκαν (η απλούστερη περίπτωση θα ήταν το Michelson) και φυσικά κρατηθεί ο καθρέπτης στον άλλο, θα δούμε το pattern συμβολής που φαίνεται στο σχήμα 4-1.

Το μέρος 2 της επιφάνειας του δείγματος έχει διαφορετικό ύψος από τα μέρη 1. Έτσι στο interferogram που σχηματίζεται βλέπουμε δυο διαφορετικές θέσεις που εμφανίζονται οι κροσσοί συμβολής. Αυτές που αντιστοιχούν στην χαμηλό μέρος του δείγματος, 1, και αυτά που αντιστοιχούν στο υψηλό, 2. Η διαφορά ύψους οδηγεί στην αλλαγή της θέση που εμφανίζονται οι κροσσοί λόγο μεταβολής της διαφοράς οπτικού δρόμου.





Εικόνα 4-2 Τομή επιφάνειας με ένα βήμα (step)

Εικόνα 4-1 Σχηματική απεικόνιση της αναμενόμενης εικόνας συμβολής από μια επιφάνεια με ένα βήμα

Με την μέθοδο αυτή μπορούμε πολύ γρήγορα και χωρίς δυσκολία να εκτιμήσουμε την τραχύτητα του δείγματός που μελετάται. Όπως παρουσιάστηκε το μόνο που χρειάζεται είναι ένα συμβολόμετρο ενώ η εικόνα της συμβολής μπορεί να εκτιμηθεί χωρίς καμία περεταίρω επεξεργασία. Παρόλα αυτά δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί ούτε το ύψος του δείγματος ούτε το σχετικό ύψος των ανωμαλιών που μπορεί να έχει

4.1.1 Φιλτράρισμα στην στατική μέθοδο.

Όταν η στατική μέθοδος χρησιμοποιείται για υλικά με μεγάλη τραχύτητα είναι πρακτικά αδύνατο να εντοπισθεί η μετατόπιση των κροσσών μιας και η συχνότητα με την οποία θα συμβαίνει το shifting θα είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, είτε λόγο background noise είτε από τμήμα του φωτός της πηγής που δεν έχει συμβάλει (από κάποιο μικρό misalignment στα οπτικά στοιχεία της διάταξης) να μην μπορεί να ξεχωρισθεί το ζητούμενο. Απαιτείται λοιπόν επεξεργασία στην εικόνα της συμβολής (image processing) ώστε να φιλτραριστούν τα μη επιθυμητά σήματα και να παραμείνει μόνο η εικόνα της συμβολής καθαρά. Γυρνώντας πίσω στην βασική εξίσωση που περιγράφει την ένταση της ακτινοβολίας όταν συμβάλουν δυο δέσμες φωτός έχουμε

$$I = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S I_R} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Ο σημαντικός όρος στην παραπάνω εξίσωση είναι η διαφορά φάσης $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ αφού αυτός είναι ο όρος της συμβολής.

Λύνοντας ως προς το συνημίτονο λοιπόν προκύπτει

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{I - (I_S + I_R)}{2\sqrt{I_S I_R}}$$

Με αυτή την μέθοδο δηλαδή χρειάζονται 3 εικόνες. Μια της εικόνας του δείγματος (sample) από σύστημα. Μια της εικόνας του καθρέπτη αναφοράς και την εικόνα της συμβολής.

Στην συνέχεια εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση ως πράξεις μεταξύ εικόνων στο MATLAB παίρνουμε μια καθαρή εικόνα συμβολής.

4.2 Phase-Shifting Interferometry (PSI)

Η ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια στην μέτρηση επιφανειών όμως απαιτεί καλύτερες μεθόδους από μια απλή οπτική εκτίμηση των μοτίβων των κροσσών που προκύπτουν κάθε φορά. Στην προηγούμενη τεχνική η ανάλυση γίνονταν έχοντας 2 σταθερούς βραχίονες στο συμβολόμετρο. Η phase shifting συμβολομετρία βασίζεται στην ελεγχόμενη μετακίνηση ενός από τους 2 βραχίονες, συνήθως του καθρέπτη αναφοράς. Η μετακίνηση πραγματοποιείται με την χρήση κάποιου μηχανισμού μετακίνησης μικρών βημάτων και μεγάλης ακρίβειας και επαναληψιμότητας.

Η εξίσωσή της συμβολής για ένα συμβολόμετρο που ο καθρέπτης αναφοράς μπορεί να κινείται πάνω στον άξονα του βραχίονά του δίνεται από την παρακάτω έκφραση

$$I(\varphi) = I_{DC} + I_{AC}\cos(\theta + \varphi)$$

Εδώ χάριν συντομίας έχουμε

 $I_{DC} = I_1 + I_2$ Ο σταθερός όρος τη συμβολής

 $I_{AC} = 2\sqrt{I_1I_2}$: Ο επίσης σταθερός όρος που προκαλεί το modulation της έντασης.

 $\theta = \Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$: Η διαφορά φάσης μεταξύ της δέσμης από το δείγμα και του καθρέπτη αναφοράς.

φ: Η φάση που εισάγει η μετακίνηση του καθρέπτη. Η οποία θα ισούται με

$$\varphi = -\frac{4\pi\zeta}{\lambda}$$

όπου ζ η μετατόπιση του καθρέπτη και λ το μήκος κύματος της πηγής.

Στα περισσότερα συστήματα PSI ο μηχανισμός μετακίνησης εισάγει μια γραμμική μεταβολή στην φάση φ. Έτσι, για κάθε pixel της εικόνας βλέπουμε ένα ημιτονοειδές σήμα το οποίο όμως εξαρτάται από την αρχική του φάση (offset). Αυτή δεν είναι τίποτε άλλο από το θ που έχει άμεση εξάρτηση από το ύψος (h) της επιφάνειας στο συγκεκριμένο σημείο που απεικονίζει το pixel. Συνεπώς, αν βρούμε το offset κάθε σημείο άμεσα μπορούμε να μετρήσουμε το ύψος της επιφάνειάς.

Για την ανάλυση αυτού του σήματος μια μέθοδος είναι η αναγνώριση ότι η εξίσωση που το περιγράφει μπορεί να γραφτεί ως

$$I(\varphi) = I_{DC} + I_{AC} \cos(\theta + \varphi)$$

$$I(\varphi) = I_{DC} + I_{AC} \left[\cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi \right]$$

Η θεωρητική προσέγγιση για την λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι το fitting ημιτόνων και συνημίτονων ώστε να κατασκευαστεί η εικόνα της συμβολής που έχει προκύψει. Αυτή η μέθοδος θα δώσει τους όρους sinθ και cosθ, και στη συνέχεια το θ. Όλη η διαδικασία μοιάζει με μια ανάλυση κατά σειρά Fourier.

Μια μέθοδος για την πραγματοποίηση αυτής της ανάλυσης είναι η χρήση των παρακάτω ολοκληρωμάτων για την εύρεση του θ.

$$N = -\int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) \sin \varphi \, d\varphi$$
$$D = \int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) \cos \varphi \, d\varphi$$

Τέλος η φάση θ προκύπτει από

$$\tan\theta = \frac{N}{D}$$

Η παραπάνω διαδικασία φυσικά περιέχει μια συνεχή κατανομή δειγμάτων, για αυτό και η ύπαρξη ολοκληρώματος, κάτι που στην πράξη κάνει την διαδικασία άπειρης διάρκειας. Έτσι, όπως και στον μετασχηματισμό Fourier χρησιμοποιείται ένα ικανό πλήθος διακριτών δειγμάτων για την ανάλυση.

Στην περίπτωση του PSI τα δείγματα είναι μια σειρά από εικόνες συμβολής για διάφορες θέσεις του κινούμενου καθρέπτη αναφοράς. Από τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα είναι ο αλγόριθμος 4 βημάτων (4-step algorithm) στον οποίο η κάμερα καταγράφει 4 διαφορετικές εικόνες συμβολής I_0 , I_1 , I_2 , I_3 . Η κάθε ένταση αντιστοιχεί σε ένα phase shift, δηλαδή σε ένα βήμα του καθρέπτη. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο οι αντίστοιχες 4 φάσεις είναι οι φ_0 , φ_1 , φ_2 , φ_3 με αρχική την $\varphi_0 = \frac{-3\pi}{4}$ και διαφορά φάσης μεταξύ μιας φάσης και της αμέσως επόμενη (βήμα) $\Delta \varphi = \frac{\pi}{2}$.

Έτσι οι σχέσεις γίνονται

 $N = I_0 + I_1 - I_2 + I_3$

$$D = -I_0 + I_1 + I_2 - I_3$$

Και αντίστοιχα υπολογίζουμε την φάση θ από το

$$\tan\theta = \frac{N}{D}$$

Υπάρχει μια πληθώρα διαθέσιμων αλγορίθμων για την μέθοδο phase shifting interferometry, με μεγάλη ποικιλία στον αριθμό των δειγμάτων που απαιτούνται για την εύρεση της φάσης (από 3 έως και 20). Η εύρεση αλγορίθμων αποτελεί ένα ξεχωριστό ερευνητικό κεφάλαιο με νέους αλγορίθμους να βρίσκονται συνεχώς. Το ίδιο συμβαίνει και για τους αλγόριθμους του phase unwrapping που θα δούμε στην συνέχεια. Η κατασκευή αλγορίθμων γίνεται με διάφορους τρόπους και περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος στις μαθηματικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εύρεση τους. Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι δεν θα αναλυθούν στην συγκεκριμένη διπλωματική.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι βασικοί αλγόριθμοι διακριτών βημάτων για το PSI.

Р	Δφ	$\tan heta$
3	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{I_0 - I_2}{I_1 - I_2}$
	2	$-I_0 + 2I_1 - I_2$
3	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{I_2 - I_1}{I_1 - I_1}$
	2	$I_0 - I_1$
4	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{I_3 - I_1}{I_1}$
	2	$I_0 - I_2$
5	$\frac{\pi}{2}$	$2I_1 - 2I_3$
	Ζ	$-I_0 + 2I_2 - I_4$
7	$\frac{\pi}{2}$	$-I_0 + 7I_2 - 7I_4 + I_6$
	Ζ	$-4I_1 + 8I_3 - 4I_5$
13	$\frac{\pi}{4}$	$-3(I_0 - I_{12}) - 4(I_1 - I_{11}) + 12(I_3 - I_0) + 21(I_4 - I_8) + 16(I_5 - I_7)$
	4	$-4(I_1 + I_{11}) - 12(I_2 + I_3 + I_0 + I_{10}) + 16(I_5 + I_7) + 24I_6$

Πίνακας 1 Αλγόριθμοι PSI [3]

Οι αλγόριθμοι διακριτών βημάτων όπως αυτοί που παρουσιάζονται στον πίνακα απαιτούν πλήρη κανονικοποίηση, την ορθογωνιότητα των Ν, D και την απαλοιφή του σταθερού όρου *I_{DC}*. Και οι 3 αυτές απαιτήσεις ισχύον προσεγγιστικά όμως υπάρχουν αλγόριθμοι που προσεγγίζουν εντελώς διαφορετικά το πρόβλημα και μπορούν να ξεπεράσουν αυτούς του περιορισμούς. Κάποιοι από αυτούς βασίζονται στην θεωρία Fourier (10) ενώ άλλοι στα χαρακτηριστικά πολυώνυμα (Surrel 1996) για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε από τους παραπάνω αλγόριθμους μπορούμε να βρούμε την φάση θ απλά υπολογίζοντας το arctan του αποτελέσματος που θα δώσει ο αλγόριθμος. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο 3 βημάτων της δεύτερης σειράς του πίνακα η φάση θ θα είναι

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_1}{I_0 - I_1}$$

Η μέθοδος PSI με την χρήση μεγάλων αισθητήρων CCD και σύγχρονων υπολογιστών μπορεί να δώσει μετρήσεις με ανάλυση ανάλογη του λ/1000 (λ: μήκος κύματος της πηγής). Η μέθοδος αυτή όμως πάσχει από την ασάφεια της φάσης όταν 2 γειτονικά σημεία πάνω στο δείγμα έχουν μεγάλη διαφορά στο ύψος τους. Για τον λόγο αυτό η μέθοδος περιορίζεται μόνο για επιφάνειες με σχετικά μικρή τραχύτητα (2 γειτονικά σημεία πρέπει να έχουν διαφορά ύψους μέχρι λ/4. Το συγκεκριμένο πρόβλημα θα

4.2.1 Το πρόβλημα της εκδίπλωσης φάσης (phase unwrapping)

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της φάσης της έντασης της ακτινοβολίας που προκύπτει λόγο συμβολής οδηγούν πάντα σε μια έκφραση που περιλαμβάνει σε όλες τις περιπτώσεις το arctangent. Το arctangent όμως έχει μια εγγενή ασάφεια, σε κάθε τιμή μπορεί να προστεθεί οποιοδήποτε πολλαπλάσια του 2π και το arctangent θα δώσει το ίδιο αποτέλεσμα. Για τον δισδιάστατο χώρο συγκεκριμένα το atan2(x,y) έχει σύνολο τιμών (-π,π], συνεπώς η χαρτογράφηση της φάσης θα έχει και αυτή το ίδιο σύνολο τιμών κάτι που δεν μπορεί να υποτεθεί γενικά σε καμία περίπτωση. Άρα θα πρέπει με βάση αυτή την όπως αποκαλείται wrapped χαρτογράφηση της φάσης να ευρεθεί η πραγματική. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται phase unwrapping και έχει μελετηθεί εκτενώς από διάφορα βιβλία και έρευνες.

4.2.1.1 Το μονοδιάστατο πρόβλημα.

Πριν προχωρήσουμε στο πραγματικό πρόβλημα που θέλουμε να αντιμετωπίσουμε ας δούμε την περίπτωση ενός μονοδιάστατου σήματος του οποίου το σύνολο τιμών ξεπερνά το εύρος (-π,π]. Έχοντας ένα τέτοιο διακριτό σήμα x(n) μπορούμε να εισάγουμε την παραπάνω ασάφεια του 2π, να κάνουμε wrap δηλαδή, με τον εξής τρόπο.

- 1. Υπολογίζουμε το sin(x)
- 2. Υπολογίζουμε το cos(x)
- Υπολογίζουμε το atan2 του sin(x) και cos(x). Το atan2 μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση

$$atan2 = \begin{cases} \tan^{-1}\frac{a}{b}, & a > 0 \ b > 0\\ \tan^{-1}(\frac{a}{b}) + \pi, & a > 0 \ b < 0\\ \tan^{-1}(\frac{a}{b}) - \pi, & a < 0 \ b > 0\\ \tan^{-1}(\frac{a}{b}), & a < 0 \ b < 0 \end{cases}$$

Η νέα συνάρτηση $x_w(n)$ που θα προκύψει θα έχει την ασάφεια κατά 2π (wrapped συνάρτηση). Για την $x_w(n)$ θα ισχύει

$$x_w(n) = W[X(n)]$$

Όπου

n= 1,2,...Ν ένα σύνολο διακριτών σημείων

W[] ο τελεστής που εφαρμόζει την αναδίπλωση (wrapping).

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορεί να γίνει το wrapping η κάθε μια έχει και έναν διαφορετικό τελεστή W[]. Ο ίσως πιο απλός είναι ένας τελεστής της μορφής

$$W[x(n)] = [(x(n) + \pi)mod2\pi] - \pi$$

Αν λοιπόν από κάποια πειραματική μέθοδο προκύψει ένα σήμα το οποίο είναι (ενδεχομένως) wrapped θα πρέπει να εφαρμοσθεί η διαδικασία του unwrapping για να προκύψει η πραγματική (original) φάση. Για την μονοδιάστατη περίπτωση, θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος του Itoh, ο οποίος είναι η πιο απλή τεχνική unwrapping. Μια σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι οι κλίσεις των wrapped και unwrapped σημάτων είναι κοινές παντού εκτός από τα σημεία μετάβασης (τα σημεία ασυνέχειας στο wrapped σήμα). Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της διαφοράς δύο οποιονδήποτε γειτονικών σημείων στο wrapped σήμα.

 $\Delta x_w(n) = x_w(n+1) - x_w(n) n = 1, 2, ..., N$

Στη συνέχεια ορίζεται μια αυθαίρετη τιμή στην ποσότητα $x_w(1) = x(1)$

Τέλος για τα n=2,3,...Ν Υπολογίζεται η πραγματική φάση ως

 $x(n) = x(n-1) + \Delta x_w(n-1)$

Προσομοίωση της μεθόδου με την χρήση του matlab.

Για την παρουσίαση της παραπάνω διαδικασίας θα δουλέψουμε με ένα ημιτονοειδές σήμα της μορφής $\chi(n) = 6 \sin (2\pi \frac{1}{512}n)$.





Εικόνα 4-3 Διάγραμμα από MATLAB. Πραγματικό σήμα. y άξονας: φάση σε radians

Το σήμα έχει εύρος τιμών [-6,6] υπερβαίνει δηλαδή το [-π,π] άρα μπορεί να γίνει wrap με την παραπάνω διαδικασία. Όπως περιεγράφηκε για το wrapping θα

χρησιμοποιηθεί ένας τελεστής W[]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση atan2(a,b) (four quadrant arctangent function) με a και b τα $sin x(n) \kappa \alpha i \cos x(n)$.

Παρακάτω φαίνεται το σήμα που προκύπτει από το wrapping.



Εικόνα 4-4 Wrapped phase. Σήμα που περιέχει την ασάφεια κατά 2π.

Στο παραπάνω διάγραμμά φαίνονται οι ακαριαίες μεταβολές που προκύπτουν όταν το σήμα παίρνει τιμές εκτός του εύρους [-π,π). Όταν αυτό ξεπεραστεί η συνάρτηση atan2 «επαναφέρει» την τιμή στο αντίθετο άκρο.

Για την εύρεση του πραγματικού σήματος από την wrapped φάση θα χρησιμοποιηθεί ο εξής αλγόριθμος.

- 1. Ξεκινάμε από το 2° από αριστερά δείγμα (n=2) από το σήμα $x_w(n)$.
- Υπολογίζουμε τη διαφορά μεταξύ του τρέχοντος δείγματος (n) με το αριστερά γειτονικό του
- Αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από π αφαιρούμε 2π από αυτό το δείγμα καθώς και από όλα τα δεξιά από αυτό δείγματα.
- 4. Αν η διαφορά τους είναι μικρότερη από -π προσθέτουμε 2π από αυτό το δείγμα καθώς και από όλα τα δεξιά από αυτό δείγματα.
- 5. Έχουν επεξεργαστεί όλα τα σήματα;
 - i. Αν όχι επιστρέφουμε στο 2° βήμα.
 - ii. Αν ναι τελειώνει η διαδικασία.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο MATLAB με το x_w σαν αρχικό wrapped σήμα. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η διαδικασία του unwrapping.



Εικόνα 4-5 Στιγμιότυπο σήματος ακριβώς πριν την Εικόνα 4-6 Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια της εκκίνηση της διαδικασίας του phase unwarping διαδικασίας



Εικόνα 4-7 Στιγμιότυπα κατά την διάρκεια της διαδικασίας

Τέλος στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε το τελικό unwrapped σήμα που είναι η αρχική ημιτονοειδής συνάρτηση.



Εικόνα 4-8 Καθαρό σήμα μετά την εκδίπλωση

4.2.1.2 Το δισδιάστατο πρόβλημα της εκδίπλωσης φάσης.

Η προηγούμενη ανάλυση που έγινε για το unwrapping ενός μονοδιάστατου σήματος μπορεί να επεκταθεί στις 2 διαστάσεις. Το αρχικό σήμα σε αυτή την περίπτωση θα είναι μια εικόνα, δηλαδή ένας N x N πίνακας με διάφορες εντάσεις σε κάθε στοιχείο. Για παράδειγμα μια 8-bit grayscale εικόνα έχει $2^8 = 256$ διαφορετικές εντάσεις για κάθε pixel που αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο του πίνακα. Για την προσομοίωση της μεθόδου του unwrapping θα κατασκευαστεί ένα 2-D σήμα με την συνάρτηση peaks του MATLAB με βάση ένα mesh grid 512x512. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εικόνες του παραπάνω 2-D σήματος (image1) από το MATLAB. Το σήμα παρουσιάζεται ως (8-bit) grayscale εικόνα αλλά και ως επιφάνεια με διάφορα ύψη. Η δεύτερη περίπτωση θα είναι αυτή που θα πρέπει να κατασκευαστεί από τα αποτελέσματα του n-step αλγόριθμου του Phase Shifting Interferometry.







Continuous phase map image displayed as a surface plot

Όπως και στην περίπτωση του 1-D σήματος η ασάφεια κατά 2π θα «εισαχθεί» μέσω της συνάρτησης tan2(a,b), με a = sin(image1) και b = cos(image1).To wrapped σήμα φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Εικόνα 4-10 Αρχικό σήμα



Εικόνα 4-11 Σήμα μετά την αναδίπλωση, απεικόνιση σε πίνακα έντασης



Wrapped phase image plotted as a surface

Εικόνα 4-12 Σήμα μετά την αναδίπλωση, απεικόνιση επιφάνειας

Σε αυτά τα 2 διαγράμματα βλέπουμε τις ακαριαίες μεταβολές που χαρακτηρίζουν ένα σήμα με ασάφεια κατά 2π. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να γίνουν πιο ευδιάκριτες αν δούμε μια συγκεκριμένη γραμμή του πίνακα που περιγράφει το αρχικό 2D σήμα.



Εικόνα 4-13 Γραμμή του αρχικού σήματος



Εικόνα 4-14 Γραμμή του αναδιπλωμένου σήματος

Έχοντας τώρα το wrapped 2D σήμα θα επεκτείνουμε την διαδικασία του αλγορίθμου του Itoh στις 2 διαστάσεις. Υπάρχουν 2 μέθοδοι για να το υλοποιήσουμε αυτό. Στην πρώτη μέθοδο θα γίνουν unwrap οι γραμμές με σειρά, μια κάθε φορά. Δηλαδή θα επαναληφθεί η διαδικασία που έγινε στην μια διάσταση επί τον αριθμό των γραμμών της εικόνας. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας θα είναι μια εν μέρη unwrapped εικόνα. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος θα εφαρμοστεί για όλες τις στήλες της εικόνας με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε στις γραμμές της πρώτης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το τελικό σήμα που έχει γίνει unwrapped.



Unwrapped phase image using the Itoh algorithm: the first method

Εικόνα 4-15 Τελικό σήμα μετά την αναδίπλωση



Εικόνα 4-16 Σύγκριση του πραγματικού με το τελικό σήμα μετά την διαδικασία του unwrapping. MATLAB

Η δεύτερη μέθοδος είναι η ακριβώς ανάποδη διαδικασία, δηλαδή πρώτα γίνεται το unwrapping στις στήλες και στη συνέχεια στις γραμμές.

4.2.2 Σφάλματα στην μέθοδο PSI

4.2.2.1 Απότομες αλλαγές στο ύψος της επιφάνειας.

Στην περίπτωση που μια επιφάνεια δεν είναι ομαλή, αλλά περιέχει απότομες αλλαγές, τότε κατά την μέθοδο του phase unwrapping ο αλγόριθμος θα θεωρήσει ότι η ακαριαία μεταβολή είναι ένα άλμα κατά 2π με αποτέλεσμα να το επαναφέρει, όπως εξηγήθηκε, στο αντίθετο άκρο. Δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός μεταξύ μιας ασάφειας που θα προκύψει από το arctangent και μιας ακαριαίας μεταβολής που υπάρχει στο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, αν 2 γειτονικά σημεία που απεικονίζονται από 2 διαφορετικά επίσης γειτονικά pixels, έχουν διαφορά φάσης μεγαλύτερη από π τότε αυτή η διαφορά θα ερμηνευθεί λανθασμένα από τον αλγόριθμο σαν ένα άλμα κατά 2π. Για να ελέγξουμε πότε συμβαίνει αυτό θα πρέπει να αναζητήσουμε τα μήκη των οπτικών δρόμων για τα 2 διαφορετικά αυτά σημεία στην επιφάνεια του δείγματος. Αν υποθέσουμε ότι η διαφορά στα ύψη τους είναι h τότε η διαφορά οπτικού δρόμου (OPD) για τις ακτίνες που θα «χτυπήσουν» τα 2 γειτονικά σημεία θα είναι

OPD = 2h.

Η διαφορά φάσης π σε μονάδες οπτικού δρόμου είναι $\frac{\lambda}{2}$

λ: το μήκος κύματος της μονοχρωματικής πηγής.

Άρα αν το η διαφορά ύψους h μεταξύ 2 γειτονικών σημείων είναι $h > \frac{\lambda}{4}$ τότε ο αλγόριθμος δεν θα μπορεί να το διαχωρίσει από μια ασάφεια. Αυτό είναι και το σημαντικότερο εγγενές πρόβλημα της phase shifting συμβολομετρίας, για αυτό και η μέθοδος εφαρμόζεται μόνο σε δείγματα με ομαλή επιφάνεια.

4.2.2.2 Θόρυβος

Η δεύτερη πηγή λαθών στην phase shifting συμβολομετρία είναι ο θόρυβος και οι δονήσεις της διάταξης. Οι τυχαίες δονήσεις της διάταξης μπορούν και αυτές να δημιουργήσουν κάποιο πλαστό 2π άλμα το οποίο και πάλι α αλγόριθμος δεν μπορεί να διαχωρίσει από τα πραγματικά.

4.2.2.3 Λανθασμένη μεταβολή φάσης μεταξύ των βημάτων.

Ο λόγος αυτών των σφαλμάτων μπορεί να είναι είτε λανθασμένη βαθμονόμηση του μηχανισμού που εκτελεί το phase shift είτε δονήσεις στο σύστημα και διαταραχές από το περιβάλλον της διάταξης. Το πρώτο είναι ένα γραμμικό σφάλμα για παράδειγμα αν έχουμε ένα σφάλμα ε τότε

 $i\frac{\pi}{2} \rightarrow i\frac{\pi}{2} + i\varepsilon$ όπου i=αριθμός βήματος

Ένα τέτοιο σφάλμα μεταξύ των βημάτων θα οδηγήσει σε ένα ημιτονοειδές σφάλμα στην φάση που θα έχει συχνότητα διπλάσια από αυτή των κροσσών συμβολής. Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να έχουμε ότι αυξάνοντας των αριθμό των βημάτων περιορίζουμε το σφάλμα στην φάση. Για παράδειγμα αν το σφάλμα έχει προκύψει από ένα λάθος βαθμονόμησης της τάξης του 5% αυξάνοντας τα βήματα από 5 σε 7 το σφάλμα μειώνεται κατά 3 τάξεις μεγέθους.

4.2.3 Επιφανειακή ανάλυση

Πέρα από την κάθετη ανάλυση του συστήματος η οποία θα καθορίσει τη μικρότερη δυνατή διαφορά ύψους που μπορεί να μετρηθεί σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση του συμβολόμετρου παίζει και η επιφανειακή ανάλυση. Όπως και στα κλασσικά οπτικά μικροσκόπιά η ανάλυση έχει άμεση εξάρτηση με την μεγέθυνση του συστήματος και επηρεάζει την φαινόμενη επιφανειακή διακύμανση.

ποσότητα που περιγράφει την επιφανειακή Н ανάλυση ενός συμβολομετρικού οπτικού συστήματος για τον χαρακτηρισμό επιφανειών είναι το Instrument Transfer Function (ITF). Το ITF περιγράφει την απόκριση του συστήματος για μια συγκεκριμένη χωρική συχνότητα της επιφάνειας υπό μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα, η ITF δείχνει το μετρήσιμο πλάτος τού σήματος ενός ημιτονοειδούς grating συχνότητας ν. Για την χωρική συχνότητα η πιο συνηθισμένη μονάδα που χρησιμοποιούμε είναι οι γραμμές ανά χιλιοστό (lines per milimeter l/m) ή τα ζεύγη γραμμών ανά χιλιοστό (line pairs per milimeter lp/m). Πριν συνεχίσουμε την ανάλυση της ITF ας ορίσουμε την βασική συνάρτηση μεταφοράς των οπτικών συστημάτων απεικόνισης (imaging optical systems) OTF (optical transfer function). Η OTF χαρακτηρίζει την συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες χωρικές συχνότητες. Τυπικά, η ΟΤF είναι ο μετασχηματισμός Fourier της point spread function, της παλμικής απόκρισης δηλαδή, στον κόσμο της οπτικής ή πιο απλά της εικόνας ενός σημειακού αντικειμένου-πηγής. Ένας μετασχηματισμός Fourier δίνει μια μιγαδική λύση άρα η ΟΤF είναι σύνθετη άρα μπορεί να εκφραστεί ως

 $OTF(\xi,\eta) = MTF(\xi,\eta)e^{i[PTF(\xi,\eta)]}$

Όπου,

MTF: Modulation Transfer Function, το μέτρο της OTF

PTF: Point Transfer Function, η φάση της OTF

Η MTF είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση μεταφοράς για οπτικά συστήματα, και παρουσιάζει την ικανότητα ενός οπτικού συστήματος να μεταφέρει μια αντίθεση (contrast) για μια συγκεκριμένη ανάλυση από το αντικείμενο στην εικόνα.Σύμφωνα με την αρχή του Abbe, ένα σύστημα μπορεί να διακρίνει μια χωρική συχνότητα όταν όλες οι περιθλώμενες δέσμες φωτός που πηγάζουν από αυτό αιχμαλωτιστούν από το entrance pupil του συστήματος. Στην ιδανική περίπτωση που το σύστημα είναι ιδανικό θα υπάρχει μια συχνότητα αποκοπής κάτω από την οποία δίνεται από τον νόμο του Abbe

resolution limit =
$$\frac{NA}{\lambda}$$

Η διακριτική ικανότητα του συστήματος λοιπόν, περιορίζεται από το numerical aperture που έχει άμεση σχέση με την γωνία της marginal ray.Στο σχήμα 4-17 φαίνεται ένα ιδανικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί μια πηγή με τέλεια συνοχή.



Εικόνα 4-17 4f system, η απόσταση του αντικειμένου με τον πρώτο φακό είναι ίση με μια εστιακή απόσταση.

Και η MTF του



Εικόνα 4-18 MTF ιδανικού συστήματος

Στην πραγματικότητα η MTF ενός πραγματικού συστήματος δεν έχει ορθογώνιο σχήμα, ούτε μια συχνότητα απότομης μετάβασης από 100% σε 0% αντίθεση. Αλλά, είναι μια καμπύλη που μεταβάλλεται με την χωρική συχνότητα του αντικειμένου σύμφωνα με την σχέση

$$MTF(f) = \frac{2}{\varphi} [\varphi - \cos \varphi \sin \varphi]$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\lambda f}{2NA}\right)$$
[3]

Μια τυπική MTF ενός μη ιδανικού συστήματος απεικόνισης φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4-19 Τυπική εικόνα OTF Zemax OpticStudio

Ένα γραμμικό σύστημα είναι αυτό που η απόκρισή του είναι το άθροισμα των αποκρίσεων από τα διάφορα σήματα που λαμβάνει ως inputs. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των γραμμικών συστημάτων είναι ότι για κάθε χωρική συχνότητα f (άρα και για κάθε χ συνιστώσα) υπάρχει μια συγκεκριμένη απόκριση που δίνεται από την χαρακτηριστική OTF του συστήματος. Αναλυτικότερα ο υπολογισμός του σήματος εξόδου ενός g' για ένα σήμα εσόδου g στον χώρο τω θέσεων δίνεται

$$G'(f) = ITF(f) \cdot G(f)$$

Όπου,

$$G(f) = FT\{g(x)\}$$
$$G'(f) = FT\{g'(x)\}$$

Με FT } ο μετασχηματισμός Fourier

$$FT\{\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\} e^{-2\pi i f x} dx$$

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ΟΤF μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την παρακάτω έκφραση με δεδομένα το Numerical Aperture (NA) του αντικειμενικού που θα χρησιμοποιηθεί και το μήκος κύματος της πηγής.

$$OTF(f) = \frac{2}{\pi} [\varphi - \cos \varphi \sin \varphi]$$
$$\varphi = \arccos\left(\frac{\lambda f}{2NA}\right)$$

Η παραπάνω σχέση θα δώσει μια θεωρητική προσέγγιση της ΟΤF του συστήματος για διάφορα ΝΑ.



Εικόνα 4-20 ΟΤF ενός οπτικού συστήματος με ΝΑ=0.5



Εικόνα 4-21 ΟΤF ενός οπτικού συστήματος με ΝΑ=1

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η Modulation Transfer Function της διάταξης Twyman green που σχεδιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (εικόνα 3-18).



Εικόνα 4-22 Modulus of the OTF για το συμβολόμετρο Green.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-22 η συγκεκριμένη διάταξη έχει αρκετά μικρή επιφανειακή ανάλυση, απόρροια των οπτικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ιδανική επιλογή είναι να χρησιμοποιηθεί κάποιος αντικειμενικός μικροσκοπίου στην θέση του απλού planoconvex που αυτή τη στιγμή βρίσκεται στην διάταξη.

4.3 Συμβολομετρία Σάρωσης Συμφωνίας (Coherence Scanning Interferometry CSI)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο η ανάλυση της μεθόδου PSI έδειξε ότι είναι μια μέθοδος που μπορεί να παρέχει τεράστια ακρίβεια στον χαρακτηρισμό επιφανειών. Ο έμφυτος όμως περιορισμός της είναι, όπως είδαμε, η μέτρηση επιφανειών με μεγάλες απότομες αλλαγές.

Η συμβολομετρία σάρωσης συμφωνίας ή αλλιώς συμβολομετρία σάρωσης λευκού φωτός (Wight Light Scanning Interferometry **WLSI**) επεκτείνει το φάσμα επιφανειών που μπορούν να χαρακτηριστούν με την μέθοδο της συμβολομετρίας και σε πιο τραχιές επιφάνειες. Η αρχή λειτουργίας της παραπάνω μεθόδου βασίζεται, όπως υποδεικνύει και το όνομά της, στην χρήση μιας πηγής με μικρό μήκος χρονικής συμβολής, συνήθως ένα LED λευκού φωτός. Στην μέθοδο PSI ό η πηγή που χρησιμοποιείται έχει θεωρητικά άπειρο μήκος συμφωνίας και ο στόχος ήταν η εύρεση της μεταβολής των κροσσών για διαφορετικές φάσεις. Εδώ, σε αντίθεση στόχος είναι η εύρεση τής θέσης συμβολής.

4.3.1 Αρχή Λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής κροσσοί συμβολής στην υπέρθεση 2 κυμάτων θα εμφανιστούν μόνο όταν οι 2 δέσμες που συμβάλουν έχουν διαφορά οπτικού δρόμου μικρότερη του μήκους συμφωνίας της πηγής τους. Στην περίπτωση χρήσης μονοχρωματικής πηγής το φαινόμενο αυτό δεν επηρεάζει την εμφάνιση των κροσσών μιας και για μια τέτοια πηγή το μήκος συμφωνίας είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαφορές οπτικού δρόμου που προκύπτουν στην συγκεκριμένη μέθοδο. Όταν όμως μια πηγή λευκού φωτός χρησιμοποιηθεί η ορατότητα των κροσσών έχει άμεση σχέση με την διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ των 2 κυμάτων. Οι κροσσοί θα είναι εμφανείς μόνο στην περίπτωση που η διαφορά οπτικού δρόμου τείνει στο 0. Ενώ μέγιστη ορατότητα θα επιτευχθεί στο ΟΡD=0. Στην εικόνα 4-23 φαίνεται το σήμα συμβολής συναρτήσει της διαφοράς οπτικού δρόμου (OPD).



Εικόνα 4-23 Σήμα συμβολής συναρτήσει του OPD

Βλέποντας την παραπάνω εικόνα είναι εμφανές ότι το ημιτονοειδές σήμα συμβολής έχει πλάτος το οποίο τροποποιείται από μια περιβάλουσα συνάρτηση (envelope function). Για την συγκεκριμένη συνάρτηση η περιβάλουσά της φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 4-24 Η συνάρτηση σήματος με την περιβάλουσα συνάρτησή της (κόκκινη).

4.3.2 Τυπική Διάταξη Συμβολομετρίας Σάρωσης Συμφωνίας

Η αρχή λειτουργίας λοιπόν του παραπάνω συστήματος βασίζεται στην σάρωση στον z άξονα, κάθετα δηλαδή στην επιφάνεια του δείγματος. Μια τυπική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 4-25





Τα 2 βασικότερα στοιχεία της διάταξης είναι ο συμβολομετρικός αντικειμενικός φακός και το σύστημα σε σάρωσης στον z άξονα. Τα 2 αυτά στοιχεία είναι και τα μόνα που διαφέρουν από ένα συμβατικό brightfield οπτικό μικροσκόπιο ανάκλασης. Ως πηγή χρησιμοποιείται ένα LED λευκού φωτός (πηγή χαμηλής συμφωνίας). Για αυτόν τον λόγο και για να υπάρξουν ιδανικές συνθήκες ομοιόμορφου φωτισμού στο δείγμα ένα σύστημα φωτισμού Kohler (Kohler Illumination system) χρησιμοποιείται αμέσως μετά την πηγή.

Ο αντικειμενικός, όπως και στα περισσότερα σύγχρονα μικροσκόπια, στέλνει την εικόνα του δείγματος στο άπειρο και ένας δεύτερος φακός (tube lens) την απεικονίζει στον αισθητήρα της κάμερας. Το σύστημα σάρωσης είναι ιδανικά πιεζοηλεκτρικό, όπως και στην περίπτωση της Phase Shifting μεθόδου.

Οι συμβολομετρικοί αντικειμενικοί φακοί χρησιμοποιούνται σε διατάξεις που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια, όπως τα προφιλόμετρα, γιατί προσφέρουν την επιθυμητή μεγέθυνση, κατάλληλο αριθμητικό άνοιγμα φακού, και καλύτερη ποιότητα εικόνα σε σχέση με την χρήση ενός απλού (π.χ planoconvex) φακού. Επίσης, προσφέρουν την δυνατότητα μείωσης του όγκου της διάταξης μιας και όλο το σύστημα του συμβολόμετρου (beam splitter και καθρέπτης αναφοράς) βρίσκεται μέσα στον αντικειμενικό.



Εικόνα 4-26 Commercially available interferometry objectives by Nikon.

Στην Εικόνα 4-27 φαίνεται γεωμετρικό ray tracing ενός Mirau αντικειμενικού φακού.



Εικόνα 4-27 Mirau Interference Objective

Άλλοι αντικειμενικοί φακοί για συμβολομετρία βασίζονται σε διατάξεις Michelson ή Linnik. Οι φακοί Mirau όμως είναι οι πιο μικροί σε όγκο και είναι ιδανικοί για compact συστήματα.

4.3.3 Αναμενόμενα Αποτελέσματα

Με την μέθοδο WLSI σκανάρουμε, για κάθε σημείο του δείγματος, στον z άξονα έως ότου βρούμε την θέση που οι κροσσοί συμβολής αποκτούν την μέγιστη ένταση.



Εικόνα 4-28 Εικόνες συμβολής για διάφορες θέσης του αντικειμενικού [3]

Στην Εικόνα 4-28 βλέπουμε αλλαγή στην ένταση των κροσσών συμβολής για διάφορες θέσης του αντικειμενικού φακού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι φανερό ότι η εικόνα b είναι αυτή που αντιστοιχεί στην μηδενική διαφορά οπτικού δρόμου (σε σχέση με τον καθρέπτη αναφοράς του αντικειμενικού). Συνεπώς για την θέση αυτή μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα για το ύψος της επιφάνειας.

5 Πειραματικό Μέρος

5.1 Μέτρηση επιφάνειας με ένα step.

Η απλούστερη μορφολογία επιφάνειας που μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο είναι ένα step. Παρακάτω φαίνεται το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την μέτρηση



Εικόνα 5-1 Δείγμα και η απεικόνισή του από τον ένα βραχίονα του συμβολόμετρου.

To step που θα μετρηθεί είναι η υψομετρική διαφορά μεταξύ του ηλεκτροδίου και του δείγματος. Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το συμβολόμετρο Michelson που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5-2 Διάγραμμά πειραματικής διάταξης

Ως πηγή χρησιμοποιήθηκε ένα κόκκινο διοδικό laser της Thorlabs στα 635 nm. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχέδιο της διάταξης μετά την πηγή χρησιμοποιήθηκε ένα τηλεσκόπιο για τον διπλασιασμό της διαμέτρου της δέσμης. Τέλος, το σύστημα της απεικόνισης είναι ένα τηλεσκόπιο που αποτελείται από ένα φωτογραφικό φακό και έναν αρωματικό Planoconvex. Όλες οι εστιακές αποστάσεις φαίνονται στην Εικόνα 5-3



Εικόνα 5-3 Πειραματική διάταξη

Παρακάτω βλέπουμε το αποτέλεσμα της συμβολής των 2 δεσμών. Μια από το δείγμα και μια από τον καθρέπτη.



Εικόνα 5-4 Εικόνα συμβολής Καθρέπτη αναφοράς και δείγματος

Στην Εικόνα 5-4 μέσω της συμβολής βλέπουμε το step που έχει το δείγμα που μετρήθηκε. Εύκολα είναι παρατηρήσιμο το γεγονός ότι οι κροσσοί συμβολής «σπάνε» πάνω σε μια οριζόντια ευθεία στην εικόνα. Βλέπουμε δηλαδή 2 ειδών κροσσούς στην παραπάνω εικόνα. Οι κροσσοί στο πάνω μέρος έχουν προκύψει από

την συμβολή της δέσμης αναφοράς του καθρέπτη με το μέρος της δέσμης που έχει ανακλαστεί από το δείγμα (μικρότερο ύψος). Ενώ, οι κροσσοί στο κάτω μέρος της εικόνας έχουν προκύψει από την συμβολή της δέσης αναφοράς με την ανάκλαση από το ηλεκτρόδιο (μεγαλύτερο ύψος). Αυτή η υψομετρική διαφορά έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή στην διαφορά οπτικού δρόμου (OPD) για τα 2 υλικά. Συνεπώς και την δημιουργία κροσσών σε διαφορετικά σημεία.

5.1.1 Μέτρηση της επιφάνειας του δείγματος με στατική μέθοδο.

Το επόμενο βήμα είναι να επιχειρήσουμε να μετρήσουμε την επιφάνεια ενός δείγματος με περισσότερες από 1 μεταβολές στην επιφάνεια του.

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο με πριν μόνο που αυτή την φορά θα ελέγξουμε μια μεγαλύτερη επιφάνεια του. Η οποία αποτελείται από τυπωμένες γραμμές.



Εικόνα 5-5 Υπό μέτρηση δείγμα

Με την ίδια διάταξη όπως και πριν παίρνουμε την εικόνα συμβολής. Μια από αυτές φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5-6 Εικόνα από συμβολής από έναν καθρέπτη αναφοράς και το δείγμα.

Είναι φανερό ότι από την παραπάνω εικόνα δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα για την επιφάνεια.

Θα δοκιμαστεί τώρα το βασικό φιλτράρισμα της στατικής μεθόδου.

Για να γίνει αυτό απαιτούνται 3 διαφορετικές εικόνες από την διάταξη.

 $I_s:$ εικόνα μόνο από την δέσμη που ανακλάται από το δείγμα.

 I_R : Εικόνα μόνο από την δέσμη που ανακλάται από τον καθρέπτη

Ι: Εικόνα από την συμβολή των 2 παραπάνω δεσμών.

Χρησιμοποιώντας το MATLAB μπορούμε να μετατρέψουμε τις παραπάνω εικόνες σε 8-bit gray scale images που μπορούν να επεξεργασθούν πολύ εύκολα. Στόχος όπως περιεγράφηκε και στο θεωρητικό κομμάτι είναι να βρεθεί η διαφορά φάσης Δφ σε όλο το οπτικό πεδίο που παρουσιάζει η εικόνα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία στο MATLAB



Εικόνα 5-7 Διαδικασία φιλτραρίσματος. (α) Εικόνα συμβολής Ι, (β) τελική εικόνα (γ) εικόνα του καθρέπτη I_R (δ) εικόνα του δείγματος I_S

Στην Εικόνα 5-7 α) βλέπουμε τη εικόνα συμβολής καθρέπτη και δείγματος από την διάταξη Michelson της Εικόνα 5-3. Στην Εικόνα 5-7 γ) βλέπουμε την απεικόνιση του καθρέπτη από το σύστημα Michelson αν η δέσμη από το δείγμα «μπλοκαριστεί». Αντίστοιχα η Εικόνα 5-7 δ) είναι η εικόνα του δείγματος αν η δέσμη από τον καθρέπτη «μπλοκαριστεί».

Οι 3 αυτές εικόνες είναι οι όροι της εξίσωσης

$$\cos(\Delta \varphi) = \frac{I - (I_S + I_R)}{2\sqrt{I_S I_R}}$$

Από αυτή και με την χρήση του ΜΑΤLΑΒ προκύπτει η τελική εικόνα που φαίνεται στην 5-8.



Εικόνα 5-8 Εικόνα μετά το φιλτράρισμα

Με αυτή την μέθοδο παρατηρείται μια πολύ πιο «καθαρή» εικόνα συμβολής και μπορεί να εντοπισθεί ένα μικρό shifting στις θέσεις των κροσσών. Παρόλα αυτά δεν μπορούμε και πάλι να βγάλουμε καθαρά συμπεράσματα για την επιφάνεια. Θα πρέπει να ακολουθήσουμε μια δυναμική μέθοδο για να κάνουμε ακριβείς μετρήσεις στην επιφάνεια.

5.1.2 Μέθοδος Phase shifting Interferometry

Η δυναμική τεχνική που θα ακολουθηθεί είναι η μέθοδος phase shifting interferometry η οποία αναλύθηκε στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής. Στην διάταξη της προηγούμενης παραγράφου προστέθηκε ένα μηχανικό σύστημα κίνησης, stepper motor, το οποίο θα μετακινεί το δείγμα σε διάφορες θέσεις στον z-άξονα.

Όπως περιεγράφηκε και στο θεωρητικό μέρος υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων που μπορούν να εφαρμοστούν στην μέθοδο PSI. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος 4 βημάτων με διαφορά φάσης ανάμεσα στα βήματα δφ=π/2. Οι θέσεις για τον αλγόριθμο αυτό λοιπόν θα είναι οι εξής:

Φ=0 Φ=Π/2 Φ=Π Φ=3Π/2

Η απόσταση που θα πρέπει να μετακινηθεί το δείγμα μέσω του stepper motor πρέπει να είναι λ/8 (όπου λ το μήκος κύματος της πηγής). Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα διοδικό laser που εκπέμπει στα 638 nm. Συνεπώς, το βήμα που πρέπει να εκτελέσει ο μηχανισμός είναι 80nm. Στις 5-9 έως 5-12 φαίνονται οι εικόνες συμβολής για τα 4 βήματα.



Εικόνα 5-9 Εικόνα συμβολής για φ=0 Εικόνα 5-10 Εικόνα συμβολής για φ=π/2



Εικόνα 5-11 Εικόνα συμβολής για φ=π

Εικόνα 5-12 Εικόνα συμβολής για φ=3π/2

Ο αλγόριθμος 4 βημάτων που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της φάσης των παραπάνω εικόνων είναι

$$\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}$$

Όπου, I_0 , I_1 , I_2 , I_3 οι αντίστοιχες εικόνες συμβολής του 1^{ou} , 2^{ou} , 3^{ou} και 4^{ou} βήματος

Επαναλαμβάνουμε την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε και στο μοντέλο της εκδίπλωσης φάσης στο κεφάλαιο 4 για να πάρουμε την τελική εικόνα της τοπογραφίας του υπό μελέτη δείγματος η οποία φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5-13 Επιφάνεια όπως μετρήθηκε

Η παραπάνω τοπογραφία όπως βλέπουμε δίνει σωστά αποτελέσματα όσον αφορά την γενική τοπογραφία του δείγματος. Είναι ευδιάκριτες οι τυπωμένες περιοχές πάνω στο γυαλί καθώς και το ηλεκτρόδιο στο αριστερό μέρος της εικόνας.

Παρόλα αυτά οι τιμές για τα ύψη δεν ανταποκρίνονται στις αναμενόμενες τιμές.

5.1.2.1 Σφάλματα στην διαδικασία

Το κυριότερο πρόβλημα της παραπάνω διάταξης είναι ο μηχανισμός που εκτελεί τον βηματισμό. Τα stepper motors είναι κατασκευασμένα για μετακινήσεις πολύ μεγαλύτερες από το βήμα που απαιτείται σε μια διάταξη PSI (80nm). Συνεπώς, είναι γνωστό ότι η απόσταση μεταξύ των 4 σημείων που παίρνονται οι εικόνες συμβολής θα έχουν αρκετά μεγάλο σφάλμα. Ακόμη, τα stepper motors δεν έχουν την επαναληψιμότητα για την σωστή εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας,

Τέλος, οι δονήσεις στο σύστημα από τον μηχανισμό κάνουν ακόμη πιο δύσκολη την καταγραφή των σωστών εικόνων συμβολής.

Η χρήση του stepper motor δεν ενδείκνυται για τα βήματα της μεθόδου PSI. Ιδανικά, ένας μηχανισμός μετακίνησης που βασίζεται στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Τα piezo-stages (πλατφόρμες μετακίνησής που βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) προσφέρουν ανάλυση στην κίνησή τους στην τάξη των nm. Επίσης, σε συνδυασμό με ένα closed loop σύστημα τροφοδοσίας μπορούμε να πετύχουμε πολύ μεγάλη ακρίβεια με ταυτόχρονη επαναληψιμότητα των μετακινήσεων.
5.2 Phase-shifting interferometry προσομοίωση με MATLAB

Για τον έλεγχο των δυνατοτήτων της μεθόδου phase shifting πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες προς μέτρηση επιφάνειες. Η μέθοδος της προσομοίωσης βασίζεται στην δημιουργία του σήματος συμβολής από 2 κυματικά μέτωπα. Ένα από τον καθρέπτη αναφοράς και ένα από την επιφάνεια την οποία θέλουμε να μετρήσουμε, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην απλούστερη μορφή ενός συμβολόμετρου Michelson

Θα θεωρήσουμε ότι τα κυματικά μέτωπα είναι επίπεδα. Δηλαδή θεωρούμε την ύπαρξη μια τέλειας μονοχρωματικής πηγής η οποία εκπέμπει ένα επίπεδο κύμα και οι 2 επιφάνειες στο συμβολόμετρο ανακλούν την δέσμη χωρίς το κυματικό μέτωπο να αλλάξει μορφή.



Εικόνα 5-14 Συμβολόμετρο Michelson.

Για την εύρεση της συμβολής θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση που την περιγράφει (η οποία έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2)

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Όπου I_1 και I_2 οι εντάσεις των κυμάτων. Αν θεωρήσουμε ότι τα πλάτη των ηλεκτρικών πεδίων που περιγράφουν τα 2 κύματα είναι κανονικοποιήμενα τότε

$$I_1 = A_1^2 = I_2 = A_2^2 = 1$$

Τα $\varphi_{1,2}$ είναι οι αντίστοιχες αρχικές φάσεις για τα 2 κύματα, και η διαφορά τους θ= $\varphi_1 - \varphi_2$, περιγράφει την καθυστέρηση που έχει το ένα κύμα σε σχέση με το άλλο. Η διαφορά φάσης προκύπτει από την διαφορά οπτικού δρόμου (OPD) για τις 2 δέσμες. Ενώ η διαφορά οπτικού δρόμου ισούται με το διπλάσιο της διαφοράς των 2 βραχιόνων του συμβολόμετρου

$$OPD = 2(L_1 - L_2)$$

Άρα για πηγή μήκους κύματος λ

$$\theta = \frac{2\pi(OPD)}{\lambda} = \frac{4\pi(L_1 - L_2)}{\lambda}$$

Αν υποθέσουμε ότι τα μήκη των 2 βραχιόνων είναι ίσα και η μόνη διαφορά στο OPD προκύπτει από το ύψος (z) της επιφάνειας αναφοράς τότε

$$\theta = \frac{4\pi z}{\lambda}$$

Θα ξεκινήσουμε την διαδικασία της προσομοίωσης με μονοδιάστατα δείγματα. Έστω ένα δείγμα το οποίο έχει την παρακάτω διακύμανση στα ύψη της.



Εικόνα 5-15 Ύψος (z) δείγματος προς μέτρηση

Θεωρώντας λοιπόν τους 2 βραχίονες ίσους και τις εντάσεις των ηλεκτρικών πεδίων κανονικοποιημένες η εξίσωση συμβολής γίνεται

$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta) = 2 + 2\cos(\frac{4\pi z}{\lambda})$$

Στόχος της προσομοίωσης είναι να βρεθεί το z ξεκινώντας από την παραπάνω εξίσωση συμβολής και εφαρμόζοντας την μέθοδο phase shifting, Πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος 4 βημάτων από τον πίνακα 1. Η εξίσωση συμβολής για αυτή την μέθοδο θα γραφτεί ως

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta + \varphi)$$

Με φ να είναι η φάση που εισάγει το κάθε βήμα μετακίνησης του καθρέπτη αναφοράς. Για τον αλγόριθμο 4 η φάση θα είναι φ=π/2. Άρα οι εικόνες συμβολής για τα 4 βήματα είναι

$$I_0 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + 0\right)$$
$$I_1 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \pi/2\right)$$
$$I_2 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \pi\right)$$
$$I_3 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + 3\pi/2\right)$$

Οι 4 παραπάνω εικόνες θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της εφαπτομένης του θ σύμφωνα με τον αλγόριθμο 4 βημάτων

$$\tan\theta = \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}$$

και

θ =arctan(tan θ)

Στη συνέχεια με την μέθοδο της εκδίπλωσης φάσης που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1 θα βρεθεί το z. Στην Εικόνα 5-16 φαίνεται το ύψος του δείγματος όπως υπολογίστηκε.



Εικόνα 5-16 Τοπογραφία του δείγματος μετά την μέτρηση(οι καμπύλες του δείγματος και μέτρησης επικαλύπτονται)

Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος δούλεψε σωστά και με ακρίβεια. Το root mean square error (RMSE) μεταξύ δείγματος και τιμής μέτρησης είναι σχεδόν μηδενικό.

RMSE = 1.010911860283227e-14

Το σήμα της Εικόνα 5-15 πληρεί την βασική προϋπόθεση για την μέθοδο PSI, δηλαδή δεν έχει ακαριαίες μεταβολές στα ύψη του μεγαλύτερες από λ/4=80nm. Ας δούμε την περίπτωση ενός άλλου αρχικού σήματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-17



Εικόνα 5-17 2η υπό εξέταση γραμμή

Εδώ το σήμα έχει 2 μεταβολές στο ύψος μεγαλύτερες από 80nm. Εφαρμόζοντας την ίδια ακριβώς μέθοδο η μέτρηση του ύψους στην Εικόνα 5-19



Εικόνα 5-18 Τοπογραφία 2ης επιφάνειας μέτρησης(κόκκινη καμπύλη)

Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι η μέθοδος δίνει λανθασμένα αποτελέσματα στα σημεία των απότομων μεταβολών (στα 300 και 400 pixel). Επιβεβαιώνουμε λοιπόν ότι σε περιπτώσεις με μεγάλες διακυμάνσεις του ύψους η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να δώσει σωστά αποτελέσματα. Εδώ η τιμή του RMSE είναι αρκετά μεγάλη όπως αναμένονταν. (RMSE = 32.74)

Στην συνέχεια θα ελέγξουμε ένα ακόμη σφάλμα για την μέθοδο phase shifting που είναι ο λανθασμένος βηματισμός. Και πάλι θα ξεκινήσουμε από την Εικόνα 5-16 και σε κάθε βήμα θα εισαχθεί ένα τυχαίο σφάλμα. Το σφάλμα (όπως φαίνεται κα στον κώδικα της MATLAB στο παράρτημα 6.4) εισήχθη χρησιμοποιώντας την έτοιμη γεννήτρια τυχαίων αριθμών rand της MATLAB με διάστημα (0, π/20). Οι εξισώσεις συμβολής I_1, I_2 και I_3 παίρνουν την μορφή

$$I_1 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \frac{\pi}{2} + \alpha \frac{\pi}{20}\right)$$
$$I_2 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \pi + b\frac{\pi}{20}\right)$$
$$I_3 = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \frac{3\pi}{2} + c\frac{\pi}{20}\right)$$

Όπου, a, b και c τρείς τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα (0,1) που δημιουργήθηκαν από την rand.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω μέθοδο προκύπτει η τοπογραφία στην Εικόνα 5-20.



Εικόνα 5-20 Τοπογραφία σήματος (κόκκινο) του δείγματος της Εικόνα 5-16 (μπλε) με τυχαίο σφάλμα (0,π/20) κατά την διαδικασία βηματισμού της μεθόδου.

Τρέχοντας τον κώδικα του παρατήματος 6.4.7 παίρνουμε το διάγραμμα της Εικόνα 5-20. Όπως φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση η μέθοδος δίνει εμφανή στο διάγραμμα σφάλματα, ενώ το RMSE είναι 3.69. Επίσης αξία εδώ έχει να δούμε και την κανονικοποιήμενη RMSE (nrmse) η οποία δίνεται από την

$$nRMSE = rac{RMSE}{ar{h}}$$
 = 16.1% (δεύτερη γραμμή στον πίνακα)

Τρέχοντας τον κώδικα 4 ακόμα φορές παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα.

	RMSE	nRMSE(%)
	3.85	16.7
	3.69	16.1
	3.15	14.1
	4.03	17.3
	2.64	10.5
Μέση Τιμή	3.47	14.9
Τυπικό σφάλμα μέσης	0.065	1.52
τιμής		
$\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2$		

Πίνακας 2 Rmse και nRMSE για διάφορα τυχαία σφάλματα στο διάστημα (0,π/20)

Συνεπώς, οι τιμές της μέτρησης με τον παραπάνω αλγόριθμο σχετικά με τις πραγματικές έχουν ένα nRMSE = $14.9 \pm 1.52 \%$. Μια διαφορά της τάξης του 15% υποδεικνύει ότι η μέθοδος παρουσιάζει προβλήματα όταν μηχανισμός δεν εκτελεί σωστά τα βήματα. Το παραπάνω διάστημα τυχαίου σφάλματος (0,π/20) για μια μονοχρωματική πηγή που εκπέμπει στα 630 nm θα είναι μια λανθασμένη μετακίνηση (0,788nm) $z_{error} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\pi}{20} = \frac{630}{4\pi} \frac{\pi}{20} = 7.88 \text{ nm}$

Συνεπώς, ένα λάθος λιγότερο των 10nm σε κάθε βήμα στην μέθοδο θα οδηγήσει σε σημαντική διαφορά στην μεταξύ μέτρησης και πραγματικής τιμής στο δείγμα. Εδώ είναι εμφανής και ο λόγος της χρήσης ενός piezo stage για τον βηματισμό. Η ακρίβεια του μηχανισμού είναι κάτω από nm με αποτέλεσμα τέτοια σφάλματα να περιορίζονται στο ελάχιστο.

Για να το ελέγξουμε αυτό θα επαναλάβουμε την διαδικασία του phase shifting αλλάζοντας αυτή την φορά το εύρος του τυχαίου σφάλματος σε (0,π/140). Το οποίο δίνει μια λανθασμένη μετατόπιση από 0 έως 1.25 nm.



Εικόνα 5-21 Τοπογραφία μετά την μέτρηση (κόκκινο) του δείγματος της Εικόνας 5 16 (μπλε). Ένα τυχαίο σφάλμα εύρους (0,π/140) έχει εισαχθεί κατά την διαδικασία βηματισμού της μεθόδου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-21 η μέτρηση σε αυτήν την περίπτωση δίνει αποτελέσματα που προσεγγίζουν αρκετά καλά τα αναμενόμενα. Κάτι που φαίνεται και από τα RMSE και nRMSE.

RMSE=0.53 και nRMSE = 2.7%

Μια ακόμη προσομοίωση που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι η πρόσθεση θορύβου στο σήμα της συμβολής. Για να γίνει αυτό στα 4 σήματα (I_0, I_1, I_2, I_3) θα προστεθεί θόρυβος με την συνάρτηση <u>awgn(in, snr, signalpower)</u> του MATLAB, με λόγο σήματος προς θόρυβο ($\frac{signal}{noise} = 20$). Ακολουθώντας και πάλι



την ίδια διαδικασία η τελική μέτρηση του ύψους της επιφάνειας φαίνεται στην Εικόνα 5-22.

Εικόνα 5-22 Μέτρηση ύψους γραμμής σήματος Εικόνα 5-16 με θόρυβο.

Ενώ τα RMSE = 0.0345 και nRMSE= 0.18% παίρνουν τιμές οι οποίες δείχνουν πολύ μικρά σφάλματα στην μέτρηση.

Στην Εικόνα 5-23 βλέπουμε την μέτρηση όταν η διάταξη έχει και λανθασμένο βηματισμό με εύρος(0,π/20) αλλά και θόρυβο



Εικόνα 5-23 Τοπογραφία σήματος Εικόνας 5 16 με θόρυβο και τυχαίο σφάλμα κατά την διαδικασία βηματισμού της μεθόδου.

Και εδώ παρατηρούμε την ύπαρξη λαθών στην τελική μέτρηση με RMSE= 3.58 (nRMSE=15.7%) χωρίς όμως να υπάρχει διαφορά στο RMSE όταν στην μέθοδο δεν υπήρχε θόρυβος, αλλά μόνο σφάλματα κατά την μέθοδο του τυχαίου βηματισμού. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η μη σωστή εκτέλεση των βημάτων αποτελεί την σημαντικότερη πηγή σφαλμάτων της μεθόδου.

5.2.1 Σύγκριση μεταξύ αλγορίθμων

Όπως είδαμε στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής για την μέθοδο PSI υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών αλγόριθμων για την εύρεση της φάσης. Η διαφορά των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν βρίσκεται στον αριθμό των βημάτων, άρα και των διαφορετικών εικόνων συμβολής που χρειάζονται για την υλοποίησή τους.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής μεθόδου έδειξαν ότι η σημαντικότερη πηγή σφαλμάτων στην μέθοδο είναι η ακρίβεια και κυρίως η επαναληψιμότητα μεταξύ των βημάτων. Μια μη γραμμική απόκριση του μηχανισμού που εκτελεί τον βηματισμό έχει σαν αποτέλεσμα λάθη στις μετρήσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-20. Το φαινόμενο αυτό επαυξάνεται όταν ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται περιέχει μικρό αριθμό βημάτων. Έτσι, αν και Οι αλγόριθμοί, για παράδειγμα 3 βημάτων, είναι πιο γρήγοροι και εύκολοι στην υλοποίησή τους, υστερούν στον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται την μη-επαναληψιμότητα του βηματισμού μετακίνησης.

Στο σήμα που φαίνεται στην εικόνα 5.16 θα εφαρμόσουμε την μέθοδο phase shifting με αλγόριθμο τριών, τεσσάρων και 5 βημάτων. Και στις 3 μεθόδους εφαρμόζεται ένα λάθος στους βηματισμούς. Στο πρώτο βήμα προστέθηκε ένας όρος (π/20) ενώ στο δεύτερο ο όρος (π/20 + π/40) σε κάθε μέθοδο



Εικόνα 5-24 Μέθοδος PSI με χρήση αλγορίθμου 3 βημάτων. (Δείγμα: μπλε καμπύλη)

RMSE = 7.2 και το nRMSE =27%



Εικόνα 5-25 Μέθοδος PSI με χρήση αλγορίθμου 4 βημάτων (κίτρινη καμπύλη). (Δείγμα: μπλε καμπύλη, αλγόριθμος 3 βημάτων: κόκκινη καμπύλη.)

RMSE = 4.5 και το nRMSE =19%



Εικόνα 5-26 Μέθοδος PSI με χρήση αλγορίθμου 5 βημάτων(μοβ καμπύλη). (Δείγμα: μπλε καμπύλη, αλγόριθμος 3 βημάτων: κόκκινη καμπύλη, αλγόριθμος 4 βημάτων κίτρινη καμπύλη)

RMSE = 4.5 και το nRMSE =19%

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες η χρήση του αλγόριθμου 4 βημάτων βελτίωσε αρκετά την τελική μέτρηση του σήματος. Η τιμή του RMSE έπεσε από 7.2 στο 4.5. Στην περίπτωση του αλγόριθμου 4 βημάτων τώρα, η τιμή του RMSE δεν βελτιώθηκε. Σον πίνακα 3 φαίνονται οι τιμές των 5 πλατό των παραπάνω διαγραμμάτων για το δείγμα και για τις μετρήσεις από τους 3 διαφορετικούς αλγόριθμους.

	Δείγμα	3 ^{ων} βημάτων	4 ^{ων} βημάτων	5 βημάτων
1° πλατό	0	9.3	3.968	3.96
2° πλατό	10	18.36	14.15	14.16
3° πλατό	20	27.19	24.46	24.49
4° πλατό	30	35.93	34.84	34.9
5° πλατό	40	44.76	45.24	45.36

Πίνακας 3 Τιμές στα πλατό για 3 διαφορετικούς αλγόριθμους

5.3 Συμπεράσματα

Η χαρτογράφηση επιφανειών με συστήματα που βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής έχει αποδειχθεί ως μια από τις σημαντικότερες μη επεμβατικές μεθόδους για την χαρτογράφηση μικρο-επιφανειών.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά διάφοροι μέθοδοι συμβολομετρίας και πιστοποιήθηκε η χρησιμότητα τους για την τοπογράφηση επιφανειών.

Οι στατικές μέθοδοι αποδείχθηκαν ικανές να δώσουν πληροφορία για την τραχύτητα της επιφάνειας με πολύ απλό και γρήγορο τρόπο χωρίς όμως την δυνατότητα ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων.

Αντίθετα, οι δυναμικές μέθοδοι δίνουν αυτή την δυνατότητα.

Η μέθοδος PSI προσφέρει μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων, όμως απαιτεί την χρήση ενός piezo stage για την σωστή εφαρμογή της μεθόδου. Επίσης, όπως εξηγήθηκε, η μέθοδος περιορίζεται μόνο σε επιφάνειες χωρίς απότομες μεταβολές στα ύψη τους. Τέλος, η μέθοδος CSI δεν έχει τον περιορισμό της PSI με αποτέλεσμα να επεκτείνει την δυνατότητα χρήσης της συμβολομετρίας και σε επιφάνειες με έντονες μεταβολές.

5.4 Μελλοντικοί Στόχοι

Οι μέθοδοι για την μέτρηση της τοπογραφίας επιφανειών που βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής προσφέρουν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις και σε συνδυασμό με τους σύγχρονους ευαίσθητους αισθητήρες μπορούν να εφαρμοστούν σε υλικά με διάφορες ανελαστικότητες. Επιπλέων μια διάταξη που θα πραγματοποιεί την μέθοδο PSI μπορεί να βασίζεται σε ένα συμβολόμετρο Michelson κάνοντας έτσι την κατασκευή της αρκετά φθηνή. Εξαίρεση αποτελεί το σύστημα που θα πραγματοποιεί τον βηματισμό. Οι πιεζοηλεκτρικές πλατφόρμες σε συνδυασμό με τους driver τους συνήθως αποτελούν το πιο μέρος με το μεγαλύτερο κόστος για την παραπάνω διάταξη. Όπως είδαμε όμως αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων.

Παρά την ακρίβειά της, η μέθοδος έχει το εγγενές πρόβλημα ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δείγματα με απότομες αλλαγές στην επιφάνεια. Για τον χαρακτηρισμό τέτοιων επιφανειών απαραίτητη είναι η χρήση της μεθόδου CSI. Όπως περιγράφηκε, η χρήση μιας πηγής με ευρύ φάσμα εκπομπής επεκτείνει τις συμβολομετρικές μεθόδους και σε πιο τραχιές επιφάνειες.

Σε επόμενο στάδιο ο στόχος είναι η ανακατασκευή του συμβολόμετρου για την μέθοδο PSI με αντικατάσταση του μηχανισμού της κίνησης του δείγματος. Στην θέση του stepper motor θα τοποθετηθεί ένα piezo translational stage για την ακριβή κίνηση των βημάτων. Ακόμη, στόχος είναι η κατασκευή διάταξης για την εφαρμογή της μεθόδου συμβολομετρίας σάρωσης συμφωνίας.

Και οι 2 διατάξεις θα σχεδιαστούν με στόχο το μικρότερο δυνατό μήκος ώστε η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε άλλες διατάξεις να είναι εφικτή.

6 Appendices

6.1 Τηλεσκόπια και μη-εστιακά (afocal) συστήματα

Η βασική λειτουργία του τηλεσκοπίου είναι η μεγέθυνση του apparent size ενός αντικειμένου. Η μεγέθυνση ενός τηλεσκοπίου ορίζεται ως ο λόγος της γωνίας που αντιστοιχεί στην εικόνα με αυτή του αντικειμένου. Το τηλεσκόπιο λειτουργεί με το αντικείμενο αλλά και την εικόνα του στο άπειρο. Για το λόγο αυτό είναι ένα μη εστιακό σύστημα (afocal system).

6.1.1 Βασικοί τύποι τηλεσκοπίων

6.1.1.1 Αστρονομικό (Keplerian) τηλεσκόπιο

Αυτό το τηλεσκόπιο κατασκευάζεται από 2 συγκλίνοντες φακούς τοποθετημένους με τέτοιο τρόπο ώστε το πίσω εστιακό σημείο (back focal point) του πρώτου να ταυτίζεται με το μπροστά εστιακό σημείο του δεύτερου. Ο αντικειμενικό φακός δημιουργεί ένα ανάστροφο είδωλο στο εστιακό του σημείο, αφού οι δέσμες από το αντικείμενο έρχονται παράλληλα από το άπειρο. Στην συνέχεια ο δεύτερος φακός (προσοφθάλμιος φακός) που έχει ως αντικείμενο το είδωλο του πρώτου το απεικονίζει στο άπειρο. Από την γεωμετρική οπτική είναι γνωστό ότι όταν το αντικείμενο ενός φακού βρίσκεται πάνω στην εστιακή του απόσταση οι ακτίνες εξέρχονται από αυτόν παραλληλοποιημένες. Ο προσοφθάλμιος φακός δεν αντιστρέφει την εικόνα οπότε το τελικό είδωλο του τηλεσκοπίου είναι ανάστροφο, όπως και στο ενδιάμεσο σημείο απεικόνισης.



Εικόνα 6-1 Αστρονομικό τηλεσκόπιο [14]

6.1.2 Τηλεσκόπιο του Γαλιλαίου (Galilean telescope)

Στο τηλεσκόπιο αυτού του τύπου ο πρώτος θετικός φακός θα αντικατασταθεί από έναν αρνητικό αποκλίνον φακό. Ο τρόπος τοποθέτησης των 2 φακών δεν αλλάζει, με την μόνη διαφορά ότι τώρα η ενδιάμεση απεικόνιση δεν δημιουργείται. Το αντικείμενο για τον προσοφθάλμιο φακό (που παραμένει συγκλίνον) είναι εικονικό, άρα δεν έχει περιστραφεί και συνεπώς το τελικό είδωλο του τηλεσκοπίου είναι ορθό.



Εικόνα 6-2 Τηλεσκόπιο του Γαλιλαίου [14]

Με δεδομένο ότι η ανάλυση γίνεται για ιδανικούς «λεπτούς» φακούς μπορούν να εξαχθούν κάποιες απλές βασικές σχέσεις για όλα τα τηλεσκόπια.Το συνολικό μήκος μιας διάταξης τηλεσκοπίου θα είναι

$$D = f_o + f_e$$

f_o: Εστιακή απόσταση αντικειμενικού (objective)

fe: Εστιακή απόσταση προσοφθάλμιου (eyelens)

Προφανώς στην περίπτωση του Galilean τηλεσκοπίου η απόσταση D είναι η διαφορά των απολύτων τιμών των εστιακών αποστάσεων των 2 φακών, αφού το f_e είναι αρνητικό.

Η μεγέθυνση του τηλεσκοπίου όπως αναφέρθηκε είναι ο λόγος της γωνίας που αντιστοιχεί στην εικόνα u_e και αυτής του αντικειμένου u_o . Το μέγεθος της ενδιάμεσης εικόνας (h) που σχηματίζει ο αντικειμενικός φακός θα είναι

$$h = u_o f_o$$

ενώ η γωνία της εικόνας που θα σχηματίσει ο προσοφθάλμιος είναι

$$u_e = \frac{-h}{f_e}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις το Magnifying Power του τηλεσκοπίου θα είναι

$$MP = \frac{u_e}{u_o} = \frac{-f_o}{f_e}$$

Στη διάταξη ενός συμβολόμετρου ένα τηλεσκόπιο χρησιμοποιείται για την αύξηση της διαμέτρου της δέσμης.

6.1.3 Σχεδιασμός και ray tracing συστημάτων τηλεσκοπίων

Η παραπάνω περιγραφή για τα διάφορα μη-εστιακά συστήματα μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας το OpticStudio του Zemax

Αστρονομικό τηλεσκόπιο

Στόχος: Διπλασιασμός της διαμέτρου μιας δέσμης 2mm.

To design έγινε χρησιμοποιώντας 2 planoconvex φακούς με τα εξής χαρακτηριστικά.

Αντικειμενικός φακός:

R=5mm

E.F.L. = 9.65

Clear Diameter = 4mm

Προσοφθάλμιος φακός.

R=10mm

E.F.L. = 19.3

Clear Diameter = 6mm



Το παραπάνω design πραγματοποιήθηκε με την εξής διαδικασία.

- 1. Βάζουμε το αντικείμενο στο άπειρο
- 2. Ορίζουμε το aperture ως entrance pupil diameter με διάμετρο 2mm
- Τοποθετούμε τον πρώτο φακό και υπολογίζουμε το εστιακό του σημείο χρησιμοποιώντας το quick focus tool.
- Τοποθετούμε τον προσοφθάλμιο σε μια τυχαία απόσταση μετά το εστιακό σημείο του αντικειμενικού.
- 5. Επιλέγοντας να έχουμε afocal image space εφαρμόζουμε την διαδικασία του optimization στην απόσταση του πέμπτου βήματος.
- 6. Από το lens data του zemax μπορούμε να δούμε ότι η δέσμη στην έξοδο έχει όντως διάμετρο 4mm. Το οποίο ικανοποιεί την θεωρητική σχέση $M = \frac{f_e}{f_0} =$

 $\frac{19.3}{9.65} = 2$

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-D	Chip Zone	Mech Semi-E	Conic	TCE x 1E-6
0 OBJECT	Standard 🔻		Infinity	Infinity			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	Standard 🔻		Infinity	10.000			1.000	0.000	1.000	0.000	0.000
2 STOP (aper)	Standard 🔻		Infinity	2.000	BK7		2.000 U	0.000	2.000	0.000	-
3 (aper)	Standard 🔻		-5.000	9.340			2.000 U	0.000	2.000	0.000	0.000
4	Standard 🔻		Infinity	18.666 V			0.016	0.000	0.016	0.000	0.000
5 (aper)	Standard 🔻		10.000	2.000	BK7		3.000 U	0.000	3.000	0.000	-
6 (aper)	Standard 🔻		Infinity	10.000			3.000 U	0.000	3.000	0.000	0.000
7 IMAGE	Standard 🔻		Infinity	-			2.018	0.000	2.018	0.000	0.000
		<									>

Gallilean Telescope

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το design για τον διπλασιασμό μιας δέσμης διαμέτρου 2mm με την χρήση ενός γαλιλαικού τηλεσκοπίου αυτή την φορά. Σε αυτή την διάταξη ο πρώτος συγκλίνων φακός έχει αντικατασταθεί από έναν αποκλίνοντα ως εξής.

Αντικειμενικός φακός:

 $R_1 = infinity$

*R*₂=10mm

E.F.L. = -19.39.65

Clear Diameter = 4mm

Προσοφθάλμιος φακός.

*R*₁=5mm

 $R_2 = infinity$

E.F.L. = 9.65

Clear Diameter = 6mm



Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με την περίπτωση του αστρονομικού τηλεσκοπίου με την μόνη διαφορά ότι παραλήφθηκε η εύρεση του εστιακού σημείου του πρώτου φακού. Εδώ ο φακός είναι αποκλίνων άρα το είδωλο που σχηματίζεται είναι εικονικό και βρίσκεται πριν από αυτόν (στο object space). Δεν υπάρχει δηλαδή ενδιάμεσο είδωλο όπως στην περίπτωση του αστρονομικού τηλεσκοπίου.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-D	Chip Zone	Mech Semi-E	Conic	TCE x 1E-6
0 OBJECT	Standard 💌		Infinity	Infinity			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	Standard 🔻		Infinity	10.000			1.000	0.000	1.000	0.000	0.000
2 STOP (aper)	Standard 🔻		Infinity	2.000	BK7		2.000 U	0.000	2.000	0.000	-
3 (aper)	Standard 🔻		5.000	9.336 V			2.000 U	0.000	2.000	0.000	0.000
4 (aper)	Standard 🔻		10.000	2.000	BK7		3.000 U	0.000	3.000	0.000	-
5 (aper)	Standard 🔻		Infinity	10.000			3.000 U	0.000	3.000	0.000	0.000
6 IMAGE	Standard 🔻		Infinity	-			2.006	0.000	2.006	0.000	0.000

Και εδώ παρατηρείται ο διπλασιασμός της δέσμης σε 4mm.

6.2 Kohler Illumination

Ο τρόπος φωτισμού του δείγματος σε ένα οπτικό μικροσκόπιο έχει μελετηθεί τους προηγούμενους δύο αιώνες. Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε ονομάζεται Critical Illumination. Σε αυτή την μέθοδο φωτισμού ένας (ή δυο) φακοί χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια εικόνα της πηγής πάνω στο δείγμα. Με αυτό τον τρόπο το δείγμα λαμβάνει αρκετό φωτισμό ο οποίος όμως δεν είναι ομοιόμορφος. Επίσης, αφού ο critical Illumination δημιουργεί μια εικόνα της πηγής πάνω στο δείγμα είναι αναπόφευκτη και η απεικόνισή της στην τελική εικόνα που βλέπει ο χρήστης.

Το τέλος του 19^{ου} αιώνα ο **August** Karl Johann Valentin **Köhler** της Carl Zeiss AG ανέπτυξε μια διαφορετική προσέγγιση του τρόπου φωτισμού για τα οπτικά μικροσκόπια. Ο August Köhler έλυσε το πρόβλημα της δημιουργίας της εικόνας της πηγής πάνω στο δείγμα, διασφαλίζοντας με την διάταξη που επινόησε, ότι στο επίπεδο του δείγματος θα δημιουργείται πάντα μια εντελώς απεστιασμένη εικόνα της πηγής. Ακόμη, με αυτήν την μέθοδο η οποία έγινε γνωστή ως Köhler illumination επιτυγχάνεται ο ομοιόμορφος φωτισμός του δείγματος.

Σε αντίθεση με τον ένα ή δυο φακούς που χρησιμοποιούνται στο critical illumination εδώ τα παρακάτω οπτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται.

- 1. Ένας φακός συλλέκτης (collector Lens).
- 2. Ένα διάφραγμα πεδίου (field diaphragm)
- 3. Ένας φακός field lens
- 4. To aperture του συστήματος
- 5. Condenser Lens



Τα στοιχεία 3,4,5 φτιάχνουν ένα απλό σύστημα 4f, με το aperture stop του συστήματος να βρίσκετε πάνω στο πεδίο Fourier του.

Στο παρακάτω design από το Zemax OpticStudio βλέπουμε ένα σύστημα με τρείς ιδανικούς λεπτούς φακούς.



Εικόνα 6-3 Kohler Illumination με λεπτούς φακούς.

Στο επόμενο γράφημα φαίνονται οι το συζυγή επίπεδα (conjugate planes) της διάταξης.



Εικόνα 6-4 Conjugate planes of Kohler Illumination. Α και Β είναι συζυγή μεταξύ τους όπως και τα 1 και 2 επίσης μεταξύ τους.

Ρυθμίζοντας ανάλογα το πρώτο διάφραγμα στην διάταξη (field diaphragm) μπορούμε χωρίς καμία άλλη παρέμβαση στο σύστημα να ρυθμίζουμε το οπτικό πεδίο του φωτισμού. Αυτό φαίνεται στη raytracing προσομοίωση στο Zemax.



Εικόνα 6-5 Σύστημα kohler illumination, περιορισμένο διάφραγμα field



Εικόνα 6-6 Σύστημα Kohler illumination, με ανοιχτό το field διάφραγμα

Στις 2 παραπάνω εικόνες βλέπουμε οτι το πεδίο που φωτίζεται πάνω στο επίπεδο του δείγματος αλλάζει ανάλογα με το field diaphragm. Πιο σημαντικό ρόλο έχει το aperture diaphragm, το οποίο καθορίζει τον κώνο φωτός που πέφτει πάνω στο δείγμα

και άρα το κατάλληλο αριθμητικό άνοιγμα (NA) που πρέπει να έχει ο αντικειμενικός. Επίσης, όπως είναι φανερό και από τα παραπάνω διαγράμματα, το aperture diaphragm ρυθμίζει την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο δείγμα αφού ανοίγοντας (ή κλείνοντάς το) περισσότερα (ή λιγότερα) σημεία της πηγής θα δίνουν ακτινοβολία που θα φτάνει στο δείγμα. Αυτό μπορεί να φανεί πιο καθαρά στα 3 παρακάτω ray tracing του Zemax.



Εικόνα 6-7 Σύστημα Kohler illumination, με ανοιχτό το apperture διάφραγμα



Εικόνα 6-8 Σύστημα Kohler illumination, με περιορισμένο το aperture διάφραγμα



Εικόνα 6-9 Σύστημα Kohler illumination, το aperture διάφραγμα αρκετά κλειστό.

6.3 Ανάλυση σε ένα οπτικού Συστήματος

Η ανάλυσης ενός οπτικού συστήματος απεικόνισης είναι η ικανότητα του να διακρίνει λεπτομέρειες στο αντικείμενο. Οι πιο συνηθισμένες μονάδες περιγραφής της ανάλυσης είναι τα ζεύγη γραμμών ανά χιλιοστό lp/mm (line pair per mm)[13]. Πρακτικά, αυτό δείχνει πόσα ζεύγη μαύρης-άσπρης γραμμής συγκεκριμένων διαστάσεων υπάρχουν μέσα σε ένα χιλιοστό



Εικόνα 6-10 Αντικείμενο με 4 ζεύγη γραμμών σε ένα χιλιοστό (4 lp/mm) [13]

Είναι ευκολά κατανοητό ότι οι μονάδες περιγράφουν χωρική συχνότητα. Ένα σύστημα απεικόνισης προσπαθεί να μεταφέρει το αντικείμενο στο επίπεδο της εικόνας με την καλύτερη πιστότητα. Το όριο της περίθλασης (diffraction limit) αλλά και διάφορα σφάλματα (αναπόφευκτα ή μη) περιορίζουν την διακριτική ικανότητα

του συστήματος. Σαν αποτέλεσμα η διαφορά αντίθεσης (μαύρη-άσπρη γραμμή) περιορίζεται σε μια έντονη και μια αχνή γκρι γραμμή. Εικόνα 7-6



Εικόνα 6-11 Οπτικό σύστημα απεικόνισης, η μεταφορά της εικόνας έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της αντίθεσής της. [13]

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-11 Οπτικό σύστημα απεικόνισης, η μεταφορά της εικόνας έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της αντίθεσής της. [13], ένα οπτικό σύστημα μπορεί να περιγράφει σαν ένα σύστημα μεταφοράς μιας συνάρτησης (αντικείμενο) από το επίπεδο του αντικειμένου στο επίπεδο της εικόνας.



Εικόνα 6-12 Οπτικό σύστημα απεικόνισης, διαγράμματα με y άξονα κανονικοποιημένη ένταση Ι.

Στην Εικόνα 6-12 Οπτικό σύστημα απεικόνισης, διαγράμματα με γ άξονα κανονικοποιημένη ένταση Ι.Εικόνα 6-12 βλέπουμε την ένταση στο αντικείμενο και στην εικόνα. Ο τετραγωνικός παλμός έχει εξομαλυνθει μεταβολές έχουν μετατραπεί σε πιο ομαλές.

```
6.4 MATLAB
```

```
6.4.1 Gaussian Distribution
```

```
Figure 9
a=-100; b=100;
x= a + (b-a)*rand(1,500);
m=(a+b)/2;
s=30;
f=gauss_distribution(x, m, s);
plot(x,f,'.');
function [f] = gauss_distribution(x, mu, s)
p1=-.5*((x-mu)/s).^2;
p2=(s*sqrt(2*pi));
```

```
f = exp(p1)./p2;
end
```

```
6.4.2 ITF
clc; clear;
v=[0:10000];
f=acos(0.000025*v);
itf=((2/pi))*(f-cos(v)*transpose(sin(v)));
semilogx(v,itf);
xlabel("Cycles/mm");
ylabel("ITF");
```

```
6.4.3 WLSI interference signal
clc;clear;
z=[-10:0.01:10];
A=1./(exp(z.^2));
y=A.*sin(8*pi*z);
plot(z,y);
xlabel("OPD");
```

```
6.4.4 Phase unwrapping method 1d
N = 512;
n = 0:N-1;
f=1/512;
%original signal x
x=6*sin(2*pi*f*n);
plot(x);
xlabel('sample');
ylabel('Original phase');
axis([0 512 -6.5 6.5])
%wraping of x
xw = atan2(sin(x),cos(x));
plot(xw);
xlabel('Sample index');
ylabel('Wrapped phase in radians');
axis([0 512 -4 4]);
title('The wrapped phase');
%unwrapping proccess
xu = xw;
for i=2:length(xw)
    diff=xw(i) - xw(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
```

```
end
end
    plot(xu);
    xlabel('Sample index');
    ylabel('Unwrapped phase in radians');
    axis([0 512 -6.5 6.5])
    title('The Unwrapped phase');
6.4.5 Phase Unwrapping method 2D
N = 512;
[X,Y] = meshgrid(1:N);
image1 = 2*peaks(N) + 0.1*X + 0.01*Y;
figure, colormap(gray), imagesc(image1)
title('Continuous phase image displayed as a visual intensity array')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels')
figure
surf(image1, 'FaceColor', 'interp',
                                                  'EdgeColor', 'none',
'FaceLighting', 'phong')
view(-30,30), camlight left, axis tight
title(' Continuous phase map image displayed as a surface plot')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels'), zlabel('Phase in radians')
figure, plot(image1(410,:))
title('A row of the continuous phase image')
xlabel('Pixels'), ylabel('Phase in radians')
%wrap the 2D image
image1_wrapped = atan2(sin(image1), cos(image1));
figure, colormap(gray(256)), imagesc(image1_wrapped)
title('Wrapped phase image displayed as a visual intensity array')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels')
figure
surf(image1_wrapped, 'FaceColor', 'interp',
'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'phong')
view(-30,70), camlight left, axis tight
title('Wrapped phase image plotted as a surface')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels'), zlabel('Phase in radians')
figure, plot(image1_wrapped(410,:))
title('A row of the wrapped phase image')
xlabel('Pixels'), ylabel('Phase in radians')
%unwrapping proccess Itoh's algorithm 1st method
image1 unwrapped = image1 wrapped;
% Sequentially unwrapping of all the rows.
for i=1:N
    image1 unwrapped(i,:) = unwrap(image1 unwrapped(i,:));
end
%Then sequentially unwrap all the columns one at a time
```

```
for i=1:N
 image1_unwrapped(:,i) = unwrap(image1_unwrapped(:,i));
end
figure
surf(image1_unwrapped, 'FaceColor', 'interp',
'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'phong')
view(-30,30), camlight left, axis tight
title('Unwrapped phase image using the Itoh algorithm: the first
method')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels'), zlabel('Phase in radians')
figure
subplot(1,2,1);
surf(image1, 'FaceColor', 'interp',
                                                  'EdgeColor', 'none',
'FaceLighting', 'phong')
view(-30,30), camlight left, axis tight
title(' Continuous phase map image displayed as a surface plot')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels'), zlabel('Phase in radians')
subplot(1,2,2);
surf(image1_unwrapped, 'FaceColor', 'interp',
'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'phong')
view(-30,30), camlight left, axis tight
title('Unwrapped phase image using the Itoh algorithm: the first
method')
xlabel('Pixels'), ylabel('Pixels'), zlabel('Phase in radians')
```

6.4.6 Phase Shifting Method Experimental

clc;clear;

```
I_0=imread("C:\Users\katop\OneDrive\Thesis\PSI\∃¦=0.png");
I_1=imread("C:\Users\katop\OneDrive\Thesis\PSI\O†=O€_2.png");
I_2=imread("C:\Users\katop\OneDrive\Thesis\PSI\O†=O€.png");
I_3=imread("C:\Users\katop\OneDrive\Thesis\PSI\O†=30€_2.png");
I_0g=rgb2gray(I_0);
I_1g=rgb2gray(I_0);
I_2g=rgb2gray(I_1);
I_3g=rgb2gray(I_2);
I_3g=rgb2gray(I_3);
```

I_0d=im2double(I_0g); I_1d=im2double(I_1g); I_2d=im2double(I_2g); I 3d=im2double(I 3g);

%Converting each image to an 330x1912 matrix

```
I_0d([331,332,333],:,:)=[];
I_0d(:,[1913,1914,1915,1916,1917,1918],:)=[];
```

```
I_1d([331,332,333,334,335,336],:,:)=[];
I_1d(:,[1913,1914,1915,1916,1917],:)=[];
I_2d([331,332,333,334,335,336,337,338,339,340],:,:)=[];
I_3d(:,[1913,1914,1915],:)=[];
tanu=(I_3d-I_1d)./(I_0d-I_2d);
figure
plot(tanu(350,:));
u=atan(tanu);
%surf(u);
%figure
%plot(u(350,:));
u_unwrapped=u;
for i=1:930
    u_unwrapped(i,:)=unwrap(u_unwrapped(i,:));
end
for i=1:930
    u_unwrapped(:,i)=unwrap(u_unwrapped(:,i));
end
%surf(u_unwrapped, 'FaceColor', 'interp',
                                                    'EdgeColor', 'none',
'FaceLighting','phong');
h=u_unwrapped*(0.638/4*pi);
figure
plot(u_unwrapped(350,:));
surf(h, 'FaceColor', 'interp',
                                                    'EdgeColor', 'none',
'FaceLighting', 'phong');
6.4.7 Phase Shifting Method modeling
Steps
clc
clear
close all
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
```

```
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 30;
y(401:481) = 40;
plot(y)
hold on
a = rand
b = rand
c = rand
I_0 = 2 + 2 \cos(4*pi*y/630);
I_1 = 2 + 2 \cos((4*pi*y/630) + pi/2);
I_2 = 2 + 2*cos((4*pi*y/630) + 2*pi/2);
I_3 = 2 + 2*cos((4*pi*y/630) + 3*pi/2);
tanu = (I_3 - I_1)./(I_0 - I_2);
u= atan(tanu);
xu = u;
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
    end
end
h = u.*630/(4*pi);
 plot (h)
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
nRMSE = RMSE/mean(h);
Abrupt Step
clc
clear
close all
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 120;
y(401:481) = 40;
plot(y)
hold on
I_0 = 2 + 2*\cos(4*pi*y/630);
I_1 = 2 + 2*\cos((4*pi*y/630) + pi/2);
I_2 = 2 + 2*cos((4*pi*y/630) + 2*pi/2);
```

```
I_3 = 2 + 2 \cos((4 pi y/630) + 3 pi/2);
tanu = (I_3 - I_1)./(I_0 - I_2);
u= atan(tanu);
xu = u;
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
    end
end
h = u.*630/(4*pi);
 plot (h)
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
Steps with error in stepping
clc
clear
close all
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 30;
y(401:481) = 40;
plot(y)
hold on
a = rand
b = rand
c = rand
I 0 = 2 + 2 \cos(4*pi*y/630);
I_1 = 2 + 2*\cos((4*pi*y/630) + pi/2 + a*pi/20);
I_2 = 2 + 2 \cos((4*pi*y/630) + 2*pi/2 + b*pi/20);
I 3 = 2 + 2*\cos((4*pi*y/630) + 3*pi/2 + c*pi/20);
tanu = (I_3 - I_1)./(I_0 - I_2);
u= atan(tanu);
xu = u;
```

```
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
    end
end
h = u.*630/(4*pi);
 plot (h)
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
nRMSE = RMSE/mean(h);
Steps with added noise
clc
clear
close all
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 30;
y(401:481) = 40;
plot(y)
hold on
I 0 = 2 + 2 \cos(4*pi*y/630);
I_1 = 2 + 2 \cos((4*pi*y/630) + pi/2);
I_2 = 2 + 2 \cos((4*pi*y/630) + 2*pi/2);
I 3 = 2 + 2 \cos((4 pi y/630) + 3 pi/2);
I_0 = awgn(I_0, 30);
I_1 = awgn(I_1, 30);
I_2 = awgn(I_2, 30);
I_3 = awgn(I_3, 30);
tanu = (I_3 - I_1)./(I_0 - I_2);
u= atan(tanu);
xu = u;
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
```

```
end
end
h = u.*630/(4*pi);
plot (h)
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
nRMSE = RMSE/mean(h);
```

3 Steps Algorithm

```
clc
clear
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 30;
v(401:481) = 40;
plot(y);
xlabel("pixels");
ylabel("height(nm)");
hold on
I = 2 + 2 \cos(4 \sin^2 y/630);
I = 2 + 2 \cos((4 p i y/630) - 2 p i/3 + p i/20);
I^2 = 2 + 2 \cos((4 \sin y/630) - 4 \sin 3 + \sin 20);
tanu = sqrt(3)*(I 1 - I 2)./(2*I 0 - I 1 - I 2);
u= atan(tanu);
xu = u;
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
    end
end
h = u.*630/(4*pi)
plot (h)
hold on
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
nRMSE = RMSE/mean(h);
```

5 step algorithm

```
clc;
clear;
x = 0:480;
y(1:100) = 0;
y(101:200) = 10;
y(201:300) = 20;
y(301:400) = 30;
y(401:481) = 40;
I = 2 + 2 \cos(4 \sin y/630 + pi/180);
I^{1} = 2 + 2 \cos((4 pi y/630) + pi/2 + pi/20);
I^2 = 2 + 2*\cos((4*pi*y/630) + 2*pi/2 + pi/20 + pi/40);
I^{3} = 2 + 2 \cos((4 + pi + y/630) + 3 + pi/2);
I = 2 + 2 \cos((4 \pi p i \pi y/630) + 4 \pi p i/2);
tanu = (2*I_1 - 2*I_3)./(-I_0 + 2*I_2 - I_4);
u= atan(tanu);
xu = u;
for i=2:length(u)
    diff=u(i) - u(i-1);
    if diff>pi
        xu(i:end) = xu(i:end) - 2*pi;
    elseif diff < -pi</pre>
        xu(i:end) = xu(i:end) + 2*pi;
    end
end
h = u.*630/(4*pi)
plot (h)
RMSE = sqrt(mean(h-y).^2);
nRMSE = RMSE/mean(h);
```

7 Αναφορές

- [1] Richard Leach and Stuart T. Smith. Basics of Precision Engineering. CRC Press, 1 edition, March 2018.
- [2] AUSTRALIA SURFACE METROLOGY LAB (ASML), Stylus Profilometry, <u>https://australiasurfacemetrologylab.org/new-page</u>
- [3] Richard Leach. Optical measurement of Surface Topography, Springer, 1st edition 2011
- [4] Zichao Bian et al. Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy
- [5] English Wikipedia / Public domain. Moire Pattern https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern
- [6] Toru Yoshizawa, Handbook of Optical Metrology principles and Applications, CRC Press 2008
- [7] Horatio Espinosa, Sunyeop Lee et all, A Novel Fluid Structure Interaction Experiment to Investigate Deformation of Structural Elements Subjected to Impulsive Loading, January 2006 Experimental Mechanics 46(6):805-824
- [8] Dennis Ghiglia and Mark Pritt, Two-dimensional phase unwrapping theory, algorithms and applications, John Wiley & Sons, 1998.
- [9] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping problem," Applied Optics, Vol. 21, No. 14, p. 2470, July 15, 1982.
- [10] Freischlad and Koliopolous 1990, de Groot 1995a
- [11] Eric P.Goodwin James c. Wyant, Field guide to interferometric optical testing, SPIE Field Guides 2006
- [12] Chen, Brown, and Song: Overview of three-dimensional shape measurement, Opt. Eng. 39(1) 10–22, January 2000.
- [13] Introduction to Modulation Transfer Functio<v, Edmund Optics <u>https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-</u> <u>notes/optics/introduction-to-modulation-transfer-function/</u>
- [14] Smith, Warren J. Modern Optical Engineering, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2008.
- [15] Peter J de Groot, The instrument transfer function for optical measurements of surface topography J. Phys. Photonics 3 (2021) 024004
- [16] Jim Schwiegerling Optical Specification, Fabrication and testing, SPIE Press, 1st edition 2011
- [17] Niser Michelson's Interferometer, https://www.niser.ac.in/sps/sites/default/files/basic_page/Michelson%20Interferom eter.pdf
- [18] Paul J caber, Interferometric profiler for rough surfaces, APPLIED OPTICS / Vol. 32, No. 19 / 1 July 1993
- [19] Karthick Sathiamoorthy & Tanjim Ahmed, Construction and Validation of a White Light Interferometer, Master's Thesis in Electrical Engineering, School of Information Science, Computer and Electrical Engineering Halmstad University, 2010