

DISS. ETH NO. 23211

**STUDY AND DEVELOPMENT  
OF A LASER BASED ALIGNMENT SYSTEM  
FOR THE COMPACT LINEAR COLLIDER**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**GUILLAUME STERN**

Diplom-Ingenieur Univ. / Diplôme d'Ingénieur  
Technische Universität München / École Centrale de Marseille

born on 19.11.1984

citizen of France

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Alain Geiger, examiner  
Dr. Hélène Mainaud Durand, co-examiner  
Prof. Dr. Markus Rothacher, co-examiner  
Prof. Dr. Sylvain Sardy, co-examiner

2016

## Abstract

The first objective of the PhD thesis is to develop a new type of positioning sensor to align components at micrometre level over 200 m with respect to a laser beam as straight line reference. The second objective is to estimate the measurement accuracy of the total alignment system over 200 m. The context of the PhD thesis is the Compact Linear Collider project, which is a study for a future particle accelerator.

The proposed positioning sensor is made of a camera and an open/close shutter. The sensor can measure the position of the laser beam with respect to its own coordinate system. To do a measurement, the shutter closes, a laser spot appears on it, the camera captures a picture of the laser spot and the coordinates of the laser spot centre are reconstructed in the sensor coordinate system with image processing. Such a measurement requires reference targets on the positioning sensor.

To reach the first objective of the PhD thesis, we used laser theory and camera model to define an accurate image processing and we performed experiments to validate a prototype of a positioning sensor. For the second objective, we could not obtain results regarding measurement accuracy because we could not develop a full alignment system under vacuum over 200 m. However, we could estimate laser pointing stability over 200 m by extrapolating results obtained over 12 m.

As a result, we present in this report a sensor design, a calibration protocol and estimations regarding measurement uncertainty. In case of a separate calibration with theodolites, we estimated the measurement uncertainty of the positioning sensor to be  $4\ \mu\text{m}$  for all coordinates. In case of a full auto-calibration, we estimated the measurement uncertainty of the positioning sensor to be  $10\ \mu\text{m}$  for the radial and the vertical coordinates and  $20\ \mu\text{m}$  for the depth coordinate. Concerning the extrapolation over long distance, we estimated laser pointing stability to be  $10\ \mu\text{m}$  for a laser beam propagation distance of 200 m.

Our work does not provide a complete laser beam alignment system at micrometre level over 200 m but it is the first necessary step towards it.

## Résumé

Le premier objectif de la thèse est de développer un nouveau type de capteur de positionnement afin d'aligner des composants au micromètre sur une distance de 200 m par rapport à un faisceau laser comme ligne droite de référence. Le second objectif est d'estimer l'exactitude de mesure du système total sur 200 m. Le contexte de la thèse est le projet du Compact Linear Collider, qui est une étude pour un futur accélérateur de particules.

Le capteur de positionnement proposé est composé d'une caméra et d'un obturateur qui peut s'ouvrir et se fermer. Le capteur peut mesurer la position du faisceau laser par rapport à son propre système de coordonnées. Pour faire une mesure, l'obturateur se ferme, un spot laser se forme à sa surface, la caméra prend une photo du spot laser et les coordonnées du spot laser sont reconstruites dans le système de coordonnées du capteur par du traitement d'image. Une telle mesure nécessite des cibles de référence sur le capteur de positionnement.

Pour atteindre le premier objectif de la thèse, nous avons utilisé la théorie du laser et de la caméra en vue de définir un traitement d'image approprié et nous avons effectué des expériences pour valider un prototype de capteur de positionnement. Pour le second objectif, nous n'avons pas obtenu de résultats concernant l'exactitude de mesure parce que nous n'avons pas pu développer un système d'alignement sous vide sur une distance de 200 m. Toutefois, nous avons pu estimer la stabilité de pointage pour une distance de propagation de 200 m en extrapolant nos résultats obtenus sur 12 m.

Nous présentons dans ce rapport un design pour le capteur, un protocole de calibration et des estimations d'incertitude de mesures. Dans le cas d'une calibration séparée avec des théodolites, nous avons estimé l'incertitude de mesure du capteur de repositionnement à 4  $\mu\text{m}$  pour toutes les coordonnées. Dans le cas d'une auto-calibration complète, nous avons estimé l'incertitude de mesure du capteur de repositionnement à 10  $\mu\text{m}$  pour les coordonnées radiale et verticale, et 20  $\mu\text{m}$  pour la coordonnée en profondeur. En ce qui concerne l'extrapolation sur longue distance, nous avons estimé la stabilité de pointage à 10  $\mu\text{m}$  pour une distance de propagation de 200 m.

Notre travail ne fournit pas un système complet d'alignement au micromètre sur 200 m mais il constitue le premier pas nécessaire dans cette direction.