

第1章 ワイヤーのたわみ量評価系の開発と、自動化手法の確立

較正に使う直線偏光はワイヤーに沿う形で生成されるため、ワイヤーがたわんでいる部分から生成される光はその偏光角がワイヤーに沿う方向からずれて生成される。そのため、ワイヤーのたわみは較正の精度に影響を及ぼし、系統誤差を生む。??項では、過去に行われた評価手法について述べ、この手法にはいくつかの問題があった。本章では、初めにこの問題について今一度触れたあと、それを解決するために開発したワイヤーのたわみを評価する系について述べる。その後、評価系の性能評価を行い、最後に実際にスパースワイヤーグリッドに対して行った評価結果について述べる。

1.1 過去の測定手法における問題点と開発目標

過去の測定手法についてもう一度 review するべきか、それとも??項をもっと簡素にし、詳細な内容をこちらに持ってくるべきか、現在のように ref するだけにすべきか悩んでいる。

過去の測定手法については、??項にて述べたとおりであり、その手法にはいくつかの問題点があった。一つ目の問題点は、その測定精度が低いことである。これはたわみ量の系統誤差への寄与を必要以上に大きくしている。また、図??にて示されているように、全てのワイヤーに対してそのたわみ量は期待される量からどの程度外れているかを判別できておらず、品質の低いワイヤーを選別できていない。もう一つの問題点は、その測定手法が人力にて行われており、測定のために労力と時間がかかる点である。これによりスパースワイヤーグリッドの量産、品質の保証・管理のために繰り返し測定することが困難である。また、人力での測定はその測定結果に人依存のバイアスを産む可能性がある。

以上の問題点を解決するため、

1. ワイヤーのたわみ量 $O(0.01^\circ)$ の精度で評価可能であること
2. 全てのワイヤーのたわみ量を自動的に評価可能であること

という2点の開発目標をもって新たなワイヤーのたわみ量の評価系を開発した。

1.2 評価系の概要と評価原理

1.2.1 評価系の概要

初めに、作成した評価系の概観を図 1.1 に示す。基本的な評価原理は??項にて述べた過去の手法と同様であり、ストレートエッジとワイヤーを同一写真内に映るように撮影することで、ストレートエッジとワイヤー間の距離からワイヤーのたわみを評価する。より高精度な評価と自動化を実現するため、過去の評価系をもとに以下の変更を行った。

1. スパースワイヤーグリッドを鉛直方向に立てて撮影を行う
2. スパースワイヤーグリッドとカメラをアクチュエータを用いて自動的に動かす
3. 一つのワイヤーに対して両端と中央だけでなく、複数の点で撮影を行う

スパースワイヤーグリッドを鉛直方向に立てることで、アクチュエータによる自動化を容易にするとともに、後述する理由により、高精度な評価を可能にした。たわみの測定の基準となるストレートエッジはスパースワイヤーグリッドの目の前 5 mm のところに固定されている。自動化の要であるアクチュエータは、スパースワイヤーグリッドを鉛直方向に動かすために Openbuilds 社の V-Slot NEMA 23 Linear Actuator (Belt Driven) を、カメラを水平方向に動かすために Openbuilds 社の V-Slot NEMA 17 Linear Actuator (Belt Driven) を用いた。どちらもベルト駆動式であり、ステッピングモーターを用いて位置制御を行うことができる。スパースワイヤーグリッドに取り付けられたアクチュエータは、ストレートエッジとワイヤーの距離をカメラの画角に収まるように近づけるために使用され、カメラに取り付けられたアクチュエータは、撮影位置を変え、ストレートエッジとワイヤーの距離を複数の点で測定するために使用される。アクチュエータの制御には、Galil 社の DMC-4020 というモーションコントローラを用いた。

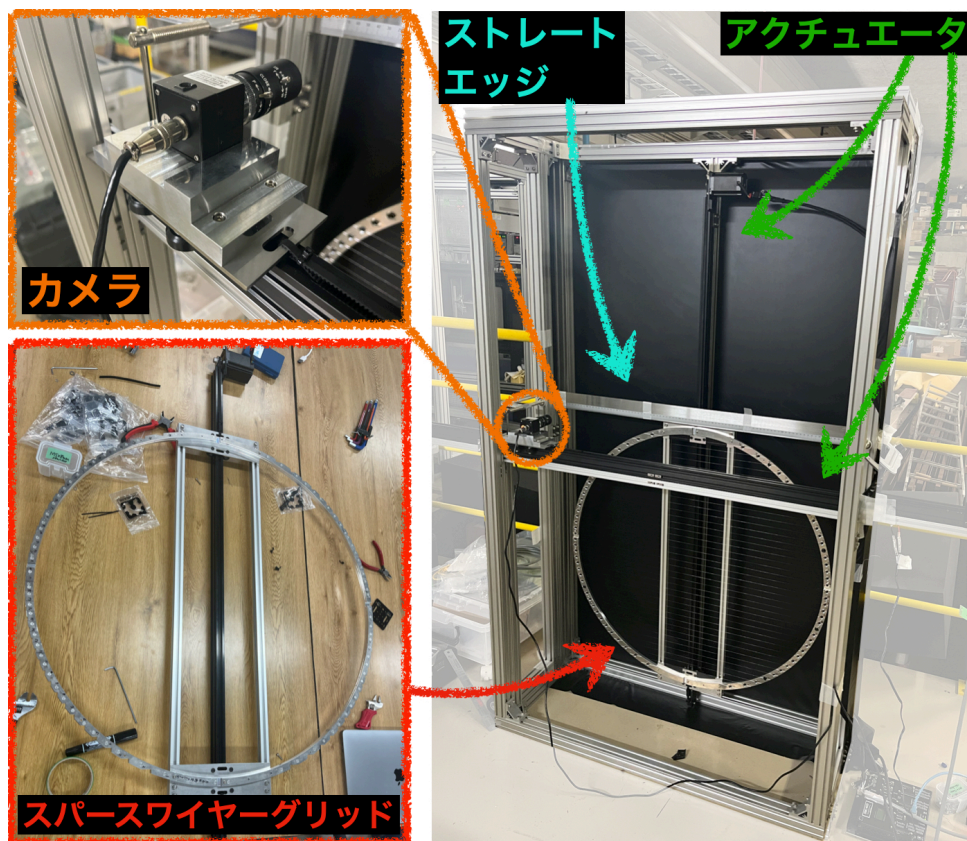


図 1.1: ワイヤーのたわみ量評価系の概観

1.2.2 評価原理

図 1.2 に評価原理の概念図を示す。 x_0, x_1, \dots, x_n は撮影箇所の位置を表し、 z_0, z_1, \dots, z_n は各写真から測定されるストレートエッジとワイヤーの距離である。得られた x_i, z_i を横軸 x 、縦軸 z でプロットすると、ワイヤーの概形を表す曲線が得られる。ワイヤーの理論曲線はワイヤー

の素材、かかっている張力により決まるカテナリー曲線であるため、得られた曲線をカテナリー曲線で fitting することでワイヤーのたわみ量を評価することができる。

ワイヤーの概形を表すカテナリー曲線は以下のような式で表される:

$$f(x) = a \cosh\left(\frac{x + L_{\text{frame}}/2}{a}\right) - a \cosh\left(\frac{L_{\text{frame}}}{2a}\right) \quad (1.1)$$

$$a = \frac{T}{\rho_W \cdot \pi R_W^2} \quad (1.2)$$

ここで、 T はワイヤーにかかる張力、 ρ_W はワイヤーの密度、 R_W はワイヤーの半径、 L_{frame} はワイヤーを固定している両端間距離である。 L_{frame} はどのワイヤーを評価するかによって異なる。なお、この式は原点 $(0, 0)$ と $(L_{\text{frame}}, 0)$ を通る拘束条件を課したカテナリー曲線を表している。

図 1.3 にワイヤーのたわみ量の評価原理の横から見た概念図を示す。これは過去の手法における概念図??を新しい系に合わせて修正したものである。各パラメータの意味とその値を表??に示す。主たる変更点としては、ストレートエッジとワイヤーの位置が逆になっており、カメラから見るとストレートエッジの方が手前に位置している点である。この系において、測定される量 z' を用いてストレートエッジとワイヤー間の距離 z を表すと、

$$z = \frac{z'}{\cos \phi} + \alpha \tan \phi \quad (1.3)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{L_{\text{camera}}}{\beta}\right) \quad (1.4)$$

となる。過去の手法における誤差の主原因として、

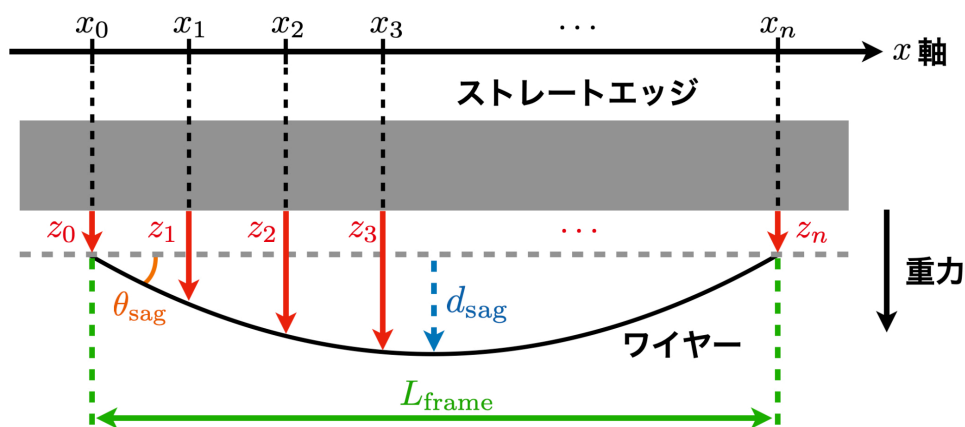


図 1.2: ワイヤーのたわみ量の評価原理

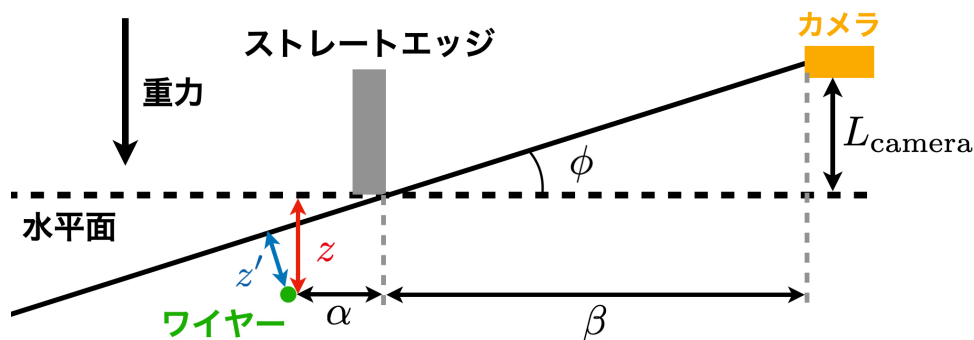


図 1.3: ワイヤーのたわみ量の評価原理の横から見た概念図

表 1.1: 図??における各パラメータの意味と値

パラメータ	意味	値
L_{frame}	ワイヤーを固定している両端間距離	100 mm
L_{camera}	カメラからストレートエッジまでの距離	100 mm
β	ストレートエッジとワイヤーの角度	45°
α	ストレートエッジとワイヤーの距離のオフセット	10 mm

1.3 解析手法

1.4 開発した評価系のパフォーマンスチェック

1.5 スパースワイヤーグリッドのたわみ量の評価