

高放射化場での効率的な測量を実現する三次元測定機を用いた測量手法の確立

ESTABLISHING A SURVEY METHOD USING A 3D MEASURING DEVICE FOR EFFICIENT SURVEYING IN HIGH RADIATION FIELDS

井上薫[#], 牧村俊助, 内山雄祐, 深尾祥紀, 角直幸, 吉田誠, 飯尾雅実

Kaoru Inoue[#], Shunsuke Makimura, Yusuke Uchiyama, Yoshinori Fukao, Naoyuki Sumi, Makoto Yoshida, Masami Iio
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

At the South Experimental Hall of the Hadron Experimental Facility at J-PARC, installation work for the beamline equipment is progressing in preparation for the COMET Phase-I experiment. To precisely position the beamline devices along the beamline, traditional methods involve setting up a theodolite and level to measure displacement or using a laser tracker to accurately survey the three-dimensional spatial positions. However, after beam operation, the COMET primary beamline room becomes highly activated (1–10 mSv/h), making the setup of surveying instruments on the beamline time-consuming and increasing radiation exposure for workers. Additionally, due to spatial constraints within the beamline area, it is difficult to install a theodolite and level. In the case of laser trackers, there is a risk of contaminating expensive equipment, and careful tracking of the reflector with the laser is required. To address these challenges, we employed the Keyence WM-3000 wide-area 3D measurement system, which can measure the three-dimensional position of a probe in space, offering an alternative to conventional surveying methods. This system allows the 3D measurement device itself to be installed in any location outside the beamline. Even if the probe tracking is interrupted, measurements can be resumed immediately as long as it remains within the auxiliary camera's field of view. This measurement method enables shorter surveying times and efficient operations in radiation environments, thereby reducing radiation exposure. In this presentation, we report on the current status of this surveying method using a 3D measurement system, which enables efficient surveying even in highly activated and confined spaces.

1. はじめに

J-PARC のハドロン実験施設は、メインリングより取り出された陽子ビームをハドロン実験ホールの二次粒子生成標的に照射し、生成された π 中間子や K 中間子等の二次ビームを複数の実験エリアに輸送し、様々な実験を並行しておこなうことができる施設である。

COMET ビームラインは、陽子ビームライン、陽子ビームラインに設置された標的と、標的から後方に 10 度の角度で取り出されるパイオンビームラインで構成されている。標的は超伝導捕獲ソレノイド電磁石内に設置され、標的で発生したパイオンは捕獲ソレノイド電磁石と超伝導輸送ソレノイド電磁石内を実験エリアまで輸送される。各超伝導電磁石は鉄ヨークに隙間なく取り囲まれるため、設置後には、ビームライン上の野書き線を直接、計測することは難しい。そのため、捕獲ソレノイド電磁石を設置する前の捕獲ソレノイド電磁石の下部鉄ヨークのみが設置されている時に、その上面を XY 平面、捕獲ソレノイド電磁石軸 (CS line) を X 軸、その垂直な軸を Y 軸、標的位置 (Target Point) を原点とした座標系 (ビームライン座標系と定義する) を構築した。その周辺にビームライン座標系との関係を記録した基準座を配置していくこととした。このような手順を踏むことで、捕獲ソレノイド電磁石やその他のビームライン機器が設置された後でも、三次元測定機を用いて基準座を測量することによって、ただちに

ビームライン座標系を呼び起こすことができる。本発表では、その研究開発成果について報告する。

2. 従来の測量手法と本手法

2.1 セオドライト・レベル方式とレーザートラッカー方式
セオドライト・レベル方式を使った測量では、機器の位置を決める固定マーカーが必要となる。多くの場合、これは床面に設けられたビーム軸を決める固定マーカーと、施設の壁面などに設置された高さを決める固定マーカーの 2 つとなる。設置する機器にも、固定マーカーと位置を合わせるための機器マーカーを用意する。次に、この固定マーカーと機器マーカーの位置のずれを測定する。セオドライトは、ビームライン上に設置し、水平角と距離を測ることで機器のビーム軸からの水平方向のずれを特定できる。一方、レベルは高さの基準点と同じ高さに設置し、スタッフ (標尺) を読み取ることで、機器の高さのずれを測定する。セオドライトとレベルは、どちらも重力を基準に水平に設置される。これらの測定によって判明したずれが最小になるように、機器の位置を慎重に微調整する。この繰り返しによって、機器をビームラインの正確な位置に配置することができる。この正確な測定のためには、セオドライトを設置したいビームライン上、レベルをビームライン高さに精密に設置することが重要となる。

レーザートラッカー方式では、三次元空間上のリフレクターの位置を精密に測定できる。そのため、リフレクターを取り付ける基準点もマーカーも任意の点に配置できる。レーザートラッカー本体も任意の場所に設置することが可能で、測定ごとに基準点を測定することによってビー

[#]inoueka@post.kek.jp

ムライン座標系に対するレーザートラッカーの位置を特定することができる。引き続いた機器の位置を測定することによって、機器の位置調整を行うことができる。

2.2 三次元測定機を用いた理由

COMET 一次ビームライン室で使用する各測定器には以下の問題が発生する。セオドライト・レベル方式では、測定器をビームライン上に設置し、測定を終えるまでにかなりの時間を要する。そのため、ビーム運転後に高度に放射化(1~10 mSv/h)が予想される COMET 一次ビームライン室では、作業員の被爆が懸念される。レーザートラッカー方式では、測定機を必要な場所に設置する際には、障害物の無い床であればキャスターによって移動は可能だが、COMET 一次ビームライン室での運転開始時には、ビームライン上に多くの機器が設置されており、作業空間が狭いためレーザートラッカーの移動に手間がかかる。また、レーザートラッカー自体が重いため、障害物の多いビームラインでは移動にクレーンが必要となる。また、今後、実験に向けて、放射化のため移動が困難なビームライン機器を設置していくたびに作業空間が狭くなってしまい、セオドライト・レベル方式やレーザートラッカー方式を採用することは現実的ではない。Table 1 に各測定方式による特性を示す。

Table 1: Characteristics of Each Surveying Method

測定方式	セオドライト・レベル	レーザートラッカー	三次元測定機
測定時間	長時間	長時間	短時間
測定精度	精密	超精密	粗い (0.5 mm 程度)
測定可能な範囲	広いが、垂直と水平の組み合わせ	広く三次元	広く三次元
コスト	中	高	低
装置の設置精度	高	高	中
被爆量	大	大	少

2.3 COMET 一次ビームライン室で適する測定方式

本研究では、可搬型測定プローブを用いて三次元空間上で測定対象物の位置を測定できる三次元測定機を用いた。セオドライト・レベル方式とは異なり、三次元測定機はビームライン上の任意の場所に短時間で設置することができる。三次元測定機による測定では、レーザートラッカー方式と同様に、三次元空間の座標を測定できるが、測定できる範囲は狭い。しかし、三次元測定機による測定自体の精度は高いので、測量の際に三次元測定機を置きなおしても、広い範囲を中程度の精度で測定することが可能となる。三次元測定機では、レーザートラッカーのリフレクターのように連続的な追尾が必要なく、測定場所が他の装置(部品など)の影になってしまい、補助カメラの追尾が外れてしまった場合でも、カメラユニットの撮影範囲内であれば、即座に測定が再開可能である。このため、短時間で簡単に三次元空間の位置を測

定できる。また、三次元測定機は軽量なため、人力で輸送・移動が可能であり、他の測定方式より手軽に測定機を設置することができる[1]。

2.4 本研究で用いた三次元測定機の構成

本研究では、キーエンスのワイドエリア三次元測定機 WM-3000 を用いた。Figure 1 に示すように三次元測定機は、カメラユニット、測定機器となる可搬型プローブ、プローブに接続して対象物の測定に使用するスタイラス、三脚で構成される。



(a) Camera unit

(b) Portable probe

Figure 1: Components of a 3D measuring system.

カメラユニットは水平および垂直方向に回転し、複数の位置センサを備えた可搬型プローブの位置と姿勢を精密に捕捉する。このときカメラユニットの水平回転角、垂直回転角、プローブとの距離、プローブの姿勢によって、測定精度が異なり、高精度な測定と中精度な測定に分類される。高精度な測定は数ミクロンの精度で測定が可能だが、回転角と距離の範囲が極めて狭いため、中精度な測定も採用した。中精度な測定に関してはカタログで仕様定義されていない。Figure 2 に示すように精度、高精度な測定と中精度な測定、測定範囲外の 3 ケースは可搬型プローブの LED の色で区別される。三次元測定機には、専用のアプリケーションソフトが付属しており、測定した値を解析することができる。それに加えてソフト内で、測定した値より平面や直線、円などの補助要素を作成することができる。今回の測量では、Fig. 3 に示す 2 種類のスタイラスを用途に応じて使い分けして測定をおこなった[2]。Figure 4 に用途を示す。2 種類のスタイラスは、球直径:0.2 mm(針状)と 5 mm(球状)となる。針



(a) 緑:高精度 (b) 黄:中精度 (c) 赤:測定範囲外

Figure 2: Distinction of measurable range by LED.

状スタイラスは、0.2 mm の中心を点で測定するため、固定マーカーなどの点を測定できるが、作業者の視力によって誤差が発生しやすく時間もかかる。一方、球状スタイラスは複数の点から平面や円筒などを測定できる。Figure 5 に示す測定基準用コーン(キャリブレーションコーン:以下 C コーン)を使用すると点測定での再現性が高く、適切な測定範囲であれば精度は高い。また、短時間で測定できる。COMET 一次ビーム室の側壁(鉄ヨーク)に C コーン取付用ボルトを準備することによって、基準座を増やすことができる。C コーンによって三次元空間上の位置を精密に再現できるため、測定機の移動時や過去の測定結果を利用して測定を再開する際にも利用できる。

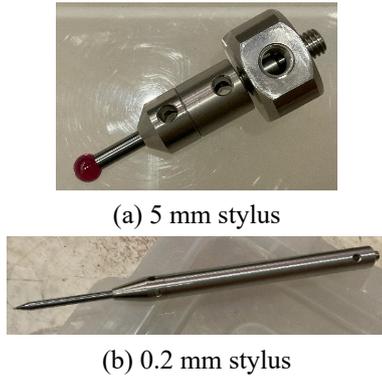


Figure 3: Spherical stylus and needle-shaped stylus.

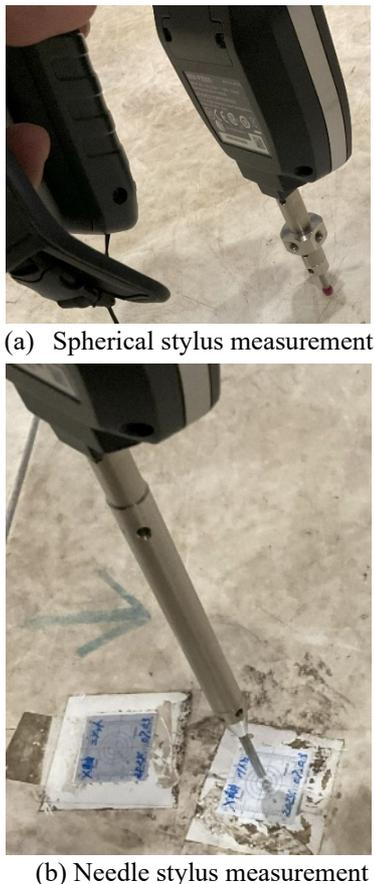
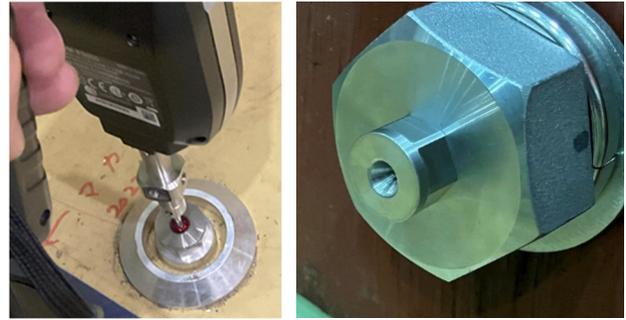


Figure 4: Surveying method using a stylus.



(a) Reference base for C-cone



(b) C-cone measurement (c) Mounting bolt for C-cone

Figure 5: C-cone for measurement reference.

3. 三次元測定機による測量手順と解析手順

3.1 測定対象物と測定手順

本測量で測定した対象物は、Fig. 6 に示す捕獲ソレノイド(Capture Solenoid) 架台(Yoke bottom)、一次ビームラインの Proton line、捕獲ソレノイド架台の中心線 CS line、CS line の垂直方向となる CS vertical、ビームライン軸高さとなる CS level (Fig. 7)、三次元座標系の基準となる Reference Element となる。各測定対象物は 2 種類のスタイラスを交換して測量をおこなった。Yoke bottom、Reference Element は先端が球形の直径 5 mm のスタイラスを用いた。Proton line、CS line、CS vertical は先端が針状で直径 0.2 mm のスタイラスを用いて、マーカー中心部の測定をおこなった。

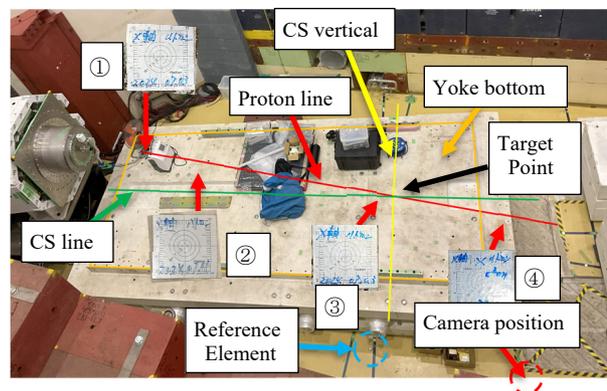


Figure 6: Definition of the beamline coordination and the markers for the proton beamline.

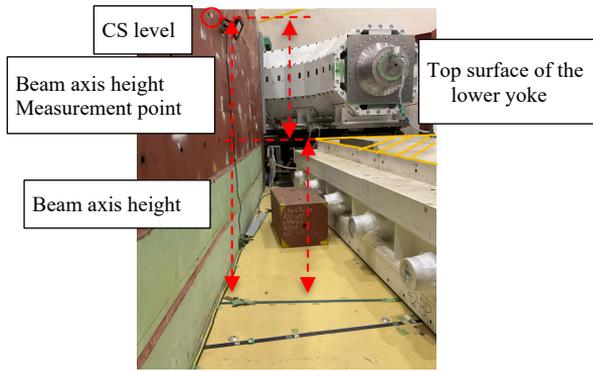


Figure 7: Measurement of beam axis height.

3.2 アプリケーションソフトによるデータ解析

三次元測定機で測定したデータの解析は、Fig. 8 に示す付属のアプリケーションソフト・WM Offline Application を使用した。このソフトウェアで三次元座標系・基準座標系の作成、測量データから、平面、直線、点などを作成して、ビームライン軸高さ、COMET 一次ビームライン室の床面などの解析をおこなった。

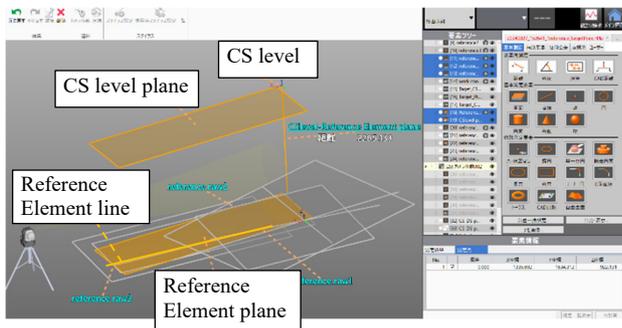


Figure 8: WM Offline Application.

3.3 測量結果とソフトウェアによるデータ解析結果

今回の測量箇所をソフトウェアによるデータ解析で定義した。ビームライン座標系は、別手法で測定したマーカーを再測定して以下のように定義した。下部鉄ヨーク上面: Yoke bottom を XY 平面、捕獲ソレノイド軸を X 軸、捕獲ソレノイド垂直軸を Y 軸、標的位置原点: Target Point を X 軸、Y 軸の交点とする。このとき、陽子ビームライン軸: Proton line を別手法で測定したマーカーの 4 点を測定して定義した。陽子ビームライン軸と Y 軸の交点は原点と一致するはずだが、不一致であった。このずれは、原点より $dX=-2.3$ 、 $dY=-0.4$ のずれが観測された。この誤差の原因を Table. 2 に示すように、各測定点の偏差について検討をおこなった。結果として、4 点測定した点のうち点①が離れすぎていて、精度が出ていないことが明らかになった。点①は、点②~④の直線上から極端に外れており、点①を除いて再解析をおこなったところ、陽子ビームライン軸と Y 軸の交点は、 $dX=-0.4$ 、 $dY=-0.08$ となり、原点と一致する結果となった。このことより、点①の測定はできているが、その値は信頼できるものではないことが判明した。測定をおこなう上で、解析による測定値の信頼性も確認しなければならない。

Table 2: Deviation at Measurement Point

測定点	偏差:4 点	再解析 偏差:3 点
点①	-0.158	—
点②	0.300	0.003
点③	0.070	0.138
点④	-0.211	-0.134

3.4 下部ヨーク上面とビームライン高さの測定

次にビーム軸高さの測定をおこなった。Figure 7 に示すビーム軸高さのマーカーは、過去にオートレベルを用いて、精密に設置されている。そして、下部鉄ヨークの上面は、設計値に一致するように設置が済んでいる。このときの設置誤差は、 ± 0.5 mm 程度であった。三次元測定機によるビーム軸高さの測定では、下部鉄ヨークの上面に準備したマーカーを参照して、三次元測定機でビームライン座標系を構築した上で、側面のビーム軸高さのマーカーを測定した。

今回の測量結果を解析した方法を次に述べる。3.3 で述べたように下部鉄ヨーク上面: Yoke bottom を XY 平面、捕獲ソレノイド軸を X 軸、捕獲ソレノイド垂直軸を Y 軸として、座標系を構築した。次に床面に C コーンを 3 つ設置して、スタイラス 0.5 mm を使用し、点測定で 3 点の測定をおこなった。3 点の測定結果より、平面・Reference Element plane を作成した。作成した平面を設計値のソレノイド軸高さに平行移動した。平行移動した平面は CS level plane とし、この平面を基準面とした。この時の原点は、ビーム軸高さのマーカーである CS level。基準軸は、床に設置した C コーンの点①と点③を直線で作成した Reference Element line となる (Fig. 8)。このような手順で解析をおこなうことで、ビーム軸高さが分かる。このように得られた結果を解析したところ、ビーム軸高さのマーカーと下部鉄ヨークの上面は、設計値と 0.544 mm の誤差となった。この誤差は、下部鉄ヨーク上面の平面度の影響が大きいと推測している。

3.5 三次元測定機による技術手法の構築

これまでの測量結果では、精度の低さが目立ってしまうことになった。しかし、本開発の目標は「高放射化場での測量」、「狭所での測量」、「短時間での測量」、「低コストによる測量」となる。精度が低くても三次元測定機の機能をいかして自由度を高め、この目標を実現する。

重要となる技術の 1 つであるカメラ移動を紹介する。初めに、すでに位置が既知の基準座の測定をおこなう。次にソフトウェア上で、新たに座標系を作成する。この座標は「ベストフィット座標系」と呼ばれ、新規の基準座を測定して、ベストフィット座標系の各点 (今回は 3 点) の過去の座標値である X、Y、Z の値を入力する。この作業をおこなうことで、過去の座標系を呼び起こすことができる。ベストフィット座標系の呼び起こしの誤差は、これまでの測量では、カメラ移動後に同じ計測点を測量すると、 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内に収まっている。しかし、この誤差は、計測点までの距離・角度にも影響を受ける可能性がある。この技術は、測量を開始する際に測定機を設置し、過去に測量した

ビームライン座標系を呼び起こすことができる。また、Fig. 9 に示すように、捕獲ソレノイドが設置されたことでCOMET 一次ビームライン室は狭所となり、見通しが悪くなってしまったが、各所に配置された基準座を測定することでビームラインや捕獲ソレノイドを跨いで測量を進めることができる。

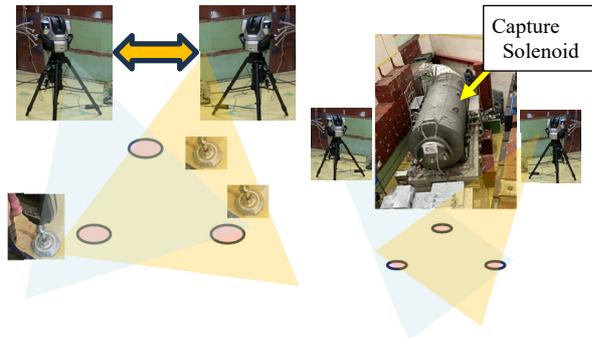


Figure 9: Method for moving the camera based on a reference base.

3.6 基準座の配置による測量の高速化

今回の測量では、別手法で測定したマーカーを基準に「ビームライン座標系」を定義した。この座標系を今後も利用するためには、複数の基準座を一次ビームライン室の床面や側壁に埋め込み、ビームライン座標系上の位置を測量する。一次ビームライン室の様々な位置、高さに基準座を配置することによって、測量時に基準座を測量すれば、様々な場所でビームライン座標系に対する位置を測定することができる。一次ビームライン室には様々な新機器がビームライン上に設置していくが、設置位置の測量の際に三次元測定機を用いることで、測量の高速化を実現することができる。

3.7 基準座の配置による今後の測量について

今後も三次元測定機を用いて一次ビームライン室の測量を進めるが、優先すべきことは基準座の配置となる。前述でも述べたように今後の一次ビームライン室は、新

らたな機器が設置される。現状では、床面の基準座を用いてビームライン座標系を呼び起こしているが、新機器の設置によって、床面の基準座が見えなくなる可能性もある。このことによって、基準座によるビームライン座標系の呼び起こしができなくなるが、床面から側壁に基準座をうつし、徐々にビームライン室の天井まで基準座を設置することで、新機器によって、基準座を呼び起こせない問題は解決できる。また、この作業は一次ビームライン室の側壁全面におこなう。

4. まとめ

三次元測定機を用いた測量では、一度に測定できる範囲は狭く、広い範囲に拡張すると精度は高くない。しかし、C コーンを使用することで、基準座の呼び起こしや作業の高速化をすることができる。

COMET 一次ビームライン室は高度に放射化し、遮蔽体で埋め尽くされるので、狭所で短時間、低コストでの測量が可能となる手法である。

今回の測量で構築したビームライン座標系を基準にした基準座をビームライン室に多数設置して、測量の高速化、高放射化場・狭所・短時間・低コストでの測量を実現する測量手法の開発を進めている。

謝辞

本研究で使用した三次元測定機は This work was supported by QUP, World Premier International Research Center Initiative (WPI), MEXT, Japan.の支援を受けたものです。また、本研究で使用したキャリブレーションコーン固定用ボルトは KEK 機械工学センターの製造支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Technical Documentation: 3D Measurement Devices, <https://www.keyence.co.jp/mykeyence/?dLangId=&dLangType=ja-JP>
- [2] Documentation of the 3D measurement device, <https://www.keyence.co.jp/products/3d-measure/cmm/wm/pr/154183001.jsp>