

ミューオン測位システムの基礎的検討

Basic Study on Muon Navigation System

浅里幸起 齋藤雅行 曾根久雄

Koki Asari Masayuki Saito Hisao Sone

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

Japan Space Systems, General Incorporated Foundation

ABSTRACT

Muon Navigation System: A system for locating positions and navigation using muons, elemental particles. Muons possess the property of penetrating objects, unlike conventional radio waves used in positioning systems. This characteristic allows the Muon Positioning System to avoid situations where signals are blocked, similar to GPS positioning. In this paper, we summarize fundamental investigations regarding this positioning system.

1. ミューオンとは何か

ミューオンとは、素粒子の一つであり、図1に示す素粒子の標準モデルのうち、クォークと共に物質を形成するフェルミ粒子の仲間レプトンに分類されるものである。ミューオンは、電子の系列にあって、第II世代の粒子に位置付けられている。



図1 素粒子の標準モデル^[1]

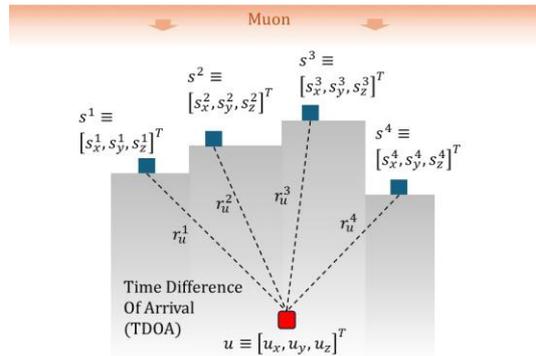
従来のGPS等の衛星測位は、電磁波を利用するので、前記の図1のモデルでいえば、ボーズ粒子のうちの光子の利用に該当する。電磁波に対して、ミューオンは物体を透過する性質が大きいため、これまでの測位技術の限界を超えて、遮蔽の多い市街地や屋内、地中、海中という従来の測位が不可能であった場所で、位置を計測する可能性を拓くことができるという大きなメリットがある。

2. ミューオンを利用した測位

ミューオンを用いる場合、比較的利用しやすいものに、宇宙線ミューオンがある。これは、宇宙線に由来するミューオンで、宇宙線が大気に入って来た時に生成されて降りそそぐミューオンをいう。このミューオンを利用した測位システムを構成できる^[2]。

実際に測位系を構成するには、図2に示すとおり、地上でミューオンを検知する基準点において、検知した時刻を計測し、更に測定点において検知した時刻を計測することで、その到達時間の差を用いて、三辺測量の原理によって位置を測定する。

尚、ミューオン測位に利用できるセンサとしては、マサチューセッツ工科大学によるセンサ製作情報がGitHubに掲載されている他、日本メーカーの提供情報がある。



測距方程式

$$r_{u_i}^p(t, t - \tau_{u_i}^p) = \|u(t) - s^p(t - \tau_{u_i}^p)\| = \sqrt{(x_u - x^p)^2 + (y_u - y^p)^2 + (z_u - z^p)^2}$$

概略位置 \hat{u} 周りの距離

$$\hat{r}_{u_i}^p \equiv \|\hat{u} - s^p\|$$

線形化した観測量

$$\hat{\rho}_{u_i}^p \equiv \rho_{u_i}^p - \hat{r}_{u_i}^p + \hat{g}_{u_i}^p \hat{u} + c\delta t^p = \hat{g}_{u_i}^p u + c\delta t_u + e_u^p$$

線形化係数行列

$$H_p(t) \equiv \begin{bmatrix} \hat{g}_{u_i}^p \\ \vdots \\ \hat{g}_{u_i}^p \end{bmatrix}, \hat{g}_{u_i}^p \equiv \left[\frac{\partial r_{u_i}^p}{\partial u} \right]_{u=\hat{u}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_u - x^p & \hat{y}_u - y^p & \hat{z}_u - z^p \\ \hat{r}_{u_i}^p & \hat{r}_{u_i}^p & \hat{r}_{u_i}^p \end{bmatrix}$$

位置と時刻の最適算出

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ c\delta t_u(t) \end{bmatrix} = \{H_p^T(t)H_p(t)\}^{-1}H_p^T(t) \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{u_i}^1(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_{u_i}^n(t) \end{bmatrix}$$

図2 測位原理の説明

3. ミューオン測位システムの産業利用

ミューオン測位システムのユースケースとして考えられているものとしては、以下のものが挙げることができる。

- (1) 屋内における測位・測量
- (2) 地下鉄道・地下道路・地下街の測量及び建設
- (3) 地下に設置する発電所や変電所の建設
- (4) シールドマシンによる掘削の進行予測
- (5) 海中における測位と航法
- (6) 地下及び海中の探査
- (7) 陸・海・空の移動体航法における利用

上記等の利用について、官民学関係機関における研究の進展が期待される。

参考文献

- [1] Wikipedia, ミュー粒子, 2024-05-07 閲覧, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ミュー粒子>
- [2] Hiroyuki K. M. Tanaka, et al., First Navigation with Wireless Muometric Navigation System (MuWNS) in Indoor and Underground Environments, iScience, May 2023.