

PG 速度センサを用いた行路長測定技術の確立

今堀 修* (東京地下鉄)

谷本 益久 (メトロ車両)

遠藤 柚季 (茨城大学)

道辻 洋平 (茨城大学)

Establishment of route length measurement technology using PG speed sensor

Osamu Imahori*, (Tokyo Metro) Masuhisa Tanimoto, (Metro Sharyo)

Yuzuki Endo, Yohei Michitsuji, (Ibaraki University)

In introducing CBTC, Tokyo Metro adopts a moving block system as a block system. In the moving block system, it is requested that the position of the train must be accurately grasped by creating an accurate position database of the operating line and collating the distance traveled by the train and this database. In this study, we describe the technology to measure the route length to be register in the database with high accuracy using a PG speed sensor.

キーワード：行路長, CBTC, 移動閉そく, PG 速度センサ, 操舵台車

(Keywords : route length, CBTC, moving block system, Pulse Generator, steering bogie)

1. はじめに

東京地下鉄では 2024 年度、丸ノ内線において CBTC システムを導入し、閉そく方式を固定閉そくから移動閉そくへ変更する計画である。移動閉そくは列車が自ら保有するデータベースに定義する位置データと、速度センサ検出速度を基に演算した自列車位置とを照合し、その結果を在線位置として地上装置へ申告することで高分解能な列車位置把握が可能であり、運行の高効率化が期待される。

移動閉そくを安全・安定に運用するには、データベースに定義する位置データと、列車が実際に在線する位置とが高精度で一致する必要があるため、いずれも高い正確性が求められるが、このうちデータベースに定義する位置データには何が適切かを考えた時、列車が実際に移動する位置をデータ化することが最適である。列車が実際に移動する位置を左右レール間中心であることから、この延長距離を“行路長”としてデータベースに定義することとした。

現在把握されているデータの中で最も行路長に近似したデータとして、地上設備の保守や営業キロ程の管理等を目的とした「路線中心長 (A,B 線間中心の延長距離)」が存在するが、図 1 に示すとおり曲線等の要因により行路長とは一致しない。このことから行路長は新たに測定する必要があり、今回、車両に搭載されている PG 速度センサ (以降「PG」【Pulse Generator】と表現する) で検出するパルスカウントから行路長を測定する手法が妥当であるか否かの検証を実施した。

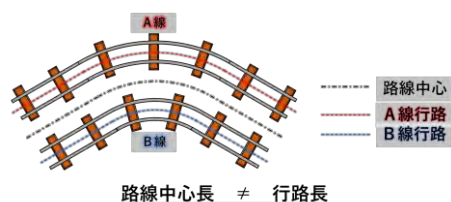


図 1 路線中心と行路の関係

妥当性検証の指針として、測定値に対する誤差に焦点をあて、本稿では PG を用いて行路長測定を実施した場合に見込まれる誤差について検証し、その妥当性を示すこととした。

2. PG を用いた行路長測定について

2.1 PG を用いる理由

行路長を測定するための手法についてはいくつかの選択肢が考えられるが、PG を用いる理由は以下のとおりである。

(1) 2.3 項に後述するとおり、測定に用いる PG 及び演算部は、測定にあたって十分な性能を有している。

(2) 鉄道事業者が自営で測定・解析可能である。また測定にあたっては機材が不要であることから、人工・期間・コストを削減できる。

(3) 測定に伴う軌道内作業を大幅に削減できることから、安全面で優位である。

(4) CBTC システムで実際に走行する車両に搭載される PG で測定するため、データベースに定義する位置と列車が実際に在線する位置が一致しやすく、システムとの親和性が高い。

2.2 PG の構造と PG 取付軸

PG は車軸端の軸箱に搭載され、車軸と同期回転する歯車の凹凸をセンサ部が回転パルスとして検出する。図 2 に PG の構造説明を示す。

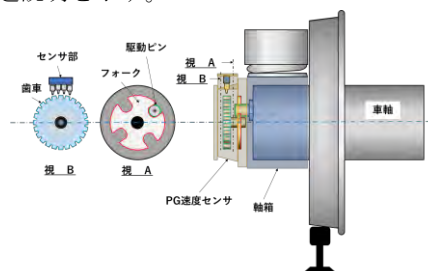


図 2 PG センサの構造説明図

PG は CT 車・CM 車の第 2 軸、第 3 軸に 1 台ずつ搭載し、それぞれ演算部に接続される。PG で検出した回転パルスは演算部にてカウント及び記録を行う。なお PG 搭載軸（以降「PG 軸」と表現する）は全て片軸操舵台車の操舵軸である。編成内での PG と演算部の関係を図 3 に示す。

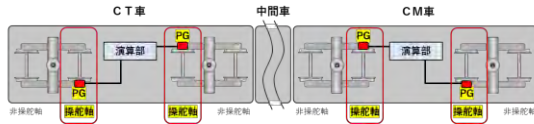


図 3 PG と演算部の編成内配置

2.3 PG 及び演算部の性能

行路長測定を行うにあたっては、1 パルスあたりの距離分解能、低速域のパルス検出性能が、東京メトロ CBTC システムにおける位置の最小単位「100mm」を超えない距離分解能及びパルス検出性能が必要である。1 パルスあたりの距離分解能について、PG 軸 1 回転あたりのパルスカウントは 180 回であり、測定時の車輪直径を 860mm とした場合、距離分解能は約 15mm となる。低速域のパルス検出性能については 0.2km/h 以上でパルスを検出可能である。速度 0km/h から 0.2km/h に至るまでに移動する距離（検知できない移動距離）を考えた時、加速度または減速度が起動抵抗や勾配等の影響を受けるため明確には定まらないが、かなり緩慢に加減速したと仮定し加速度（減速度）を 0.1km/h/s とした場合でも、その移動距離は 60mm 未満である。いずれも前述の 100mm 以下であることから、測定に用いる装置の性能は妥当であると判断した。

2.4 測定に用いる車輪と行路長算出方法

測定に用いる PG 軸の車輪は、同軸左右の車輪直径差を 0.1mm 以内とし、踏面形状は銀丸円弧踏面である。行路長はパルスカウントと車輪径から算出する。算出に用いる基準車輪径は、直線走行時にレールと接触する中立位置の車輪径を適用した。なお、パルスカウントが同一値で、車輪直径が 0.1mm 変化すると、行路長算出結果に約 0.01% の差が生じる。表 1 に走行距離の算出例を示す。

表 1 走行距離算出例

要素	説明	計算式
車輪直径 (D) [mm]	踏面中心直径。行路長測定直前に車輪径測定を実施し、0.1mm オーダーで管理する。	$D = 860.0 \text{ mm}$
円周長 (W) [mm]	$W = \pi \times D$	$W = 860.0 \times \pi = 2701.77 \text{ [mm]}$
車輪 1 回転あたりのパルスカウント (P) [回]	180 回 ※PG の減速による	$P = 180$
1 パルスあたりの走行距離 (K) [mm]	$K = W / P$	$K = 2701.77 / 180 = 15.0098 \text{ [mm]}$
検出したパルスカウント (Pn) [回]	ATC 車上装置に記録される	$Pn = 122933$
走行距離 (ℓ) [m]	$\ell = (K \times Pn) / 1000$	$\ell = (15.0098 \times 122933) / 1000 = 1845.20 \text{ [m]}$

3. 構内走行試験

3.1 試験の考え方と目的

一般的に車輪とレールの接触位置は、直線走行時と曲線走行時で異なることがわかっている。直線では左右車輪ともに車輪とレールの接触位置は両輪の中立位置にあり、中立位置の車輪径が走行距離を決めていることから、中立位置の車輪径を把握することで行路長を高精度に解析可能である。一方、曲線を走行する場合には、車輪とレールの

接触位置に変化が生じ、車軸が外軌レール寄りとなった場合の外軌車輪はフランジ側の車輪径が大きい部分で接触する。この時、内軌車輪は反フランジ側の車輪径が小さい部分で接触する。以上のことから直線部と曲線部では車輪とレールの接触位置に違いが発生する。本試験では車両基地構内の直線と曲線が直列する区間を試験区間に選定し、同一編成内で直線区間のみを走行する PG 軸と、曲線区間のみを走行する PG 軸のパルスカウントを比較した。この時、編成としての移動距離は直線区間と曲線区間で同一となる。また、移動距離 = 移動した分の行路長となる。移動した分の正確な行路長は、直線区間のみを走行した PG のパルスカウントと車輪径から解析可能であることから、直線区間のみを走行する PG 軸のパルスカウントを基準とし、曲線区間のみを走行する PG 軸のパルスカウントを比較することで、曲線区間を走行した際に生じる行路長測定誤差の程度や傾向を調べることを目的とした。

3.2 試験方法と条件

試験は走行方向に対して台車の前位軸と後位軸それぞれに分けて確認を行った（図 4）。

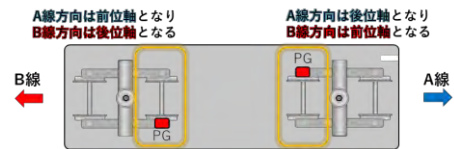


図 4 走行方向に対する前位・後位軸の関係

また、左右レールが乾燥している状態を DRY、左右レールが水で濡れている状態を WET、外軌レールのゲージコーナーへグリスを塗油した状態を OIL と称し、潤滑条件による違いについての確認も行った。その他の条件は以下のとおり。

(1) 走行区間

図 5 に構内試験における直線走行区間と曲線走行区間と PG 搭載車両との関係を示す。

CM 車は直線区間のみを走行し、CT 車は曲線区間【R=169m、カント及びスラックなし】のみを走行する。なお、A 線方向、B 線方向ともに試験を実施した。

(2) 使用車輪

CM 車、CT 車ともに PG 軸の車輪は全て同軸左右の直径差が 0.1mm 以内のものを使用した。

また、踏面形状は銀丸円弧踏面である。

(3) ブレーキ作用

CM 車、CT 車ともに PG 軸はブレーキ開放とし、滑走の要因を排除した。また PG 軸は付随軸【T 軸】であることから自発トルクによる空転は発生しない。

(4) 運転速度

A 線方向 B 線方向ともに、10km/h 程度とした。【構内速度制限による】

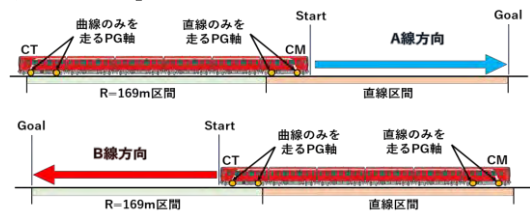
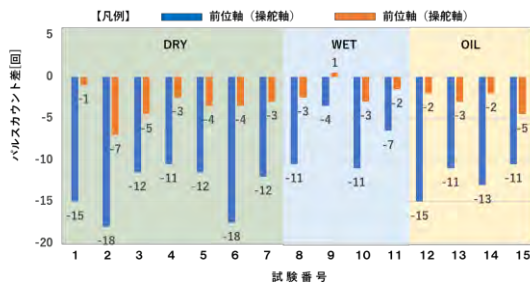


図 5 走行区間と PG 軸の関係

3.3 試験結果

試験結果を表 2 に示す。直線区間を走行する PG パルスカウントを基準とした場合、曲線区間を走行する PG は前位・後位軸ともにパルスカウントが減少する傾向となったが、全試験を通して減少度合いは後位軸の方が小さい結果であった。走行距離誤差率に換算すると前位軸の誤差率は最大-0.3%程度であったのに対し、後位軸は最大-0.12%程度であった。

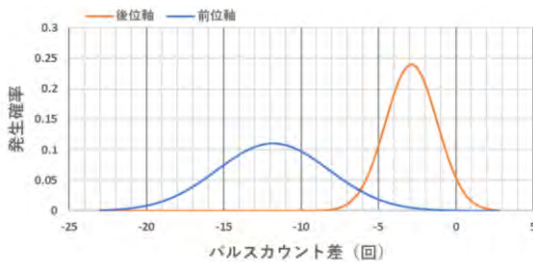
表 2 PG パルス数比較



また、パルスカウント差のバラつきを考えた時、前位軸は潤滑条件の違いによるバラつきが大きくなったのに対し、後位軸はバラつきが小さく安定した結果となった。

表 3 にパルスカウント差の平均値と標準偏差から算出した前位軸と後位軸のパルスカウント差の発生確率の正規分布を示す。

表 3 パルスカウント差の発生確率



3.4 行路長測定軸の選定

3.3 項の試験結果から、行路長測定にあたっては操舵台車後位軸が適切と考察する。その理由を以下に示す。

(1) 直線区間におけるパルスカウントは、前位軸・後位軸に由来する差異はなく、またパルスカウントと車輪径から解析した移動距離は行路長と高精度で一致する。

(2) 曲線区間におけるパルスカウントは、同じ距離を走行した直線区間と比較し減少する傾向にあるが、減少率は前位軸と比較し後位軸の方が小さく、またバラつきが少なく安定している。すなわち操舵台車後位軸の方が行路長を測定するうえで正確性が高い。

なお、本試験結果はマルチボディダイナミクスシミュレーションの結果と傾向が一致している。(※1)

4. 営業線における検証

3 項の試験結果と考察から、PG を用いた行路長測定には操舵台車後位軸を充てることとした。

また、誤差要因を極力排除するため、測定軸はブレーキ作用を開放し、使用する車輪は車輪径が適切に管理された左右輪径差が 0.1mm 以内のものを使用することとした。

なお、踏面形状は銀丸円弧踏面である。

上記の車両条件のもと、実際の営業線において、PG と他の測定手法による行路長測定を実施し、結果を比較することで、その妥当性を検証することとした。比較対象は「手計測定(メジャーをレール頭頂部に沿わせて左右レール長さの平均値を算出)」と「レーザードップラー(軌道計測車に搭載したレーザードップラーセンサを用いて左右レール長さの平均値を算出)」とした。

4.1 比較検証の前提

検証を行うにあたっての測定基準点を、各駅に設置されるホームドア用位置停止検知用地上子 (P3') とした。

図 6 に P3' の配置状況と測定概念を示す。

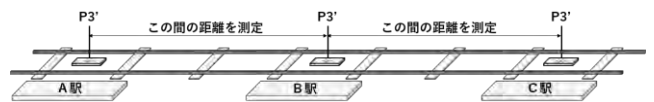


図 6 測定基準点 (P3') の配置状況

また検証を行う区間は、区間総延長が長く、曲線比率の高い駅間を選定した。当該区間の総延長は約 1282m であり、そのうち約 44% が R=400m 以下の急曲線で構成されている。図 7 に比較検証を行った区間の概略を示す。

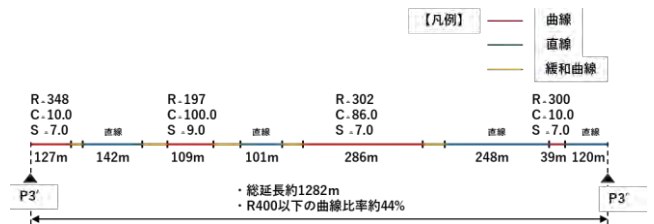


図 7 各測定手法の比較を行った区間の概略

4.2 比較検証結果

比較検証結果を表 4 に示す。測定結果の最小値と最大値の差は 0.44m であり、その誤差率は 0.03% であった。

また、この他にも R=400m 以下の曲線が 50% 前後含まれる区間を 3 区間選定し PG と手計の比較検証を実施したところ、いずれも誤差率は 0.03% 未満であった (表 5)。このことから、それぞれの測定手法による測定結果は高精度で一致することが確認できた。

表 4 図 7 の区間における各測定手法の比較結果

測定手法	測定結果	最小値と最大値の差	誤差率
PG	1 2 8 2 . 5 2 m	0. 4 4 m	0. 0 3 %
手計	1 2 8 2 . 5 2 m		
レーザードップラー	1 2 8 2 . 0 8 m		

表 5 PG 計測と手計測の結果比較

測定区間	測定手法	測定結果	差	誤差率
駅間A	PG	3 4 4 . 8 9 m	0. 0 9 m	0. 0 2 6 %
	手計	3 4 4 . 9 8 m		
駅間B	PG	3 5 3 . 0 5 m	0. 0 5 m	0. 0 1 4 %
	手計	3 5 3 . 1 0 m		
駅間C	PG	1 1 3 6 . 4 6 m	0. 2 2 m	0. 0 1 9 %
	手計	1 1 3 6 . 6 8 m		



写真 1 営業線における行路長の手計測状況

4.3 データの再現性

同一区間を同一編成にて複数回走行し、PG による行路長測定値の再現性を確認した。表 6 は各駅間における 1 日目走行と 2 日目走行の誤差率を示す。全体的に概ね一致しており、最も誤差の大きかった o 駅～p 駅間で 0.05% であったことから、データの再現性は高いものと考察する。

表 6 PG による行路長測定 of 再現性

各駅間別	1 日目走行と 2 日目走行の誤差率									
駅間	a-b	b-c	c-d	d-e	e-f	f-g	g-h	h-i	i-j	j-k
誤差率 (%)	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
駅間	k-l	l-m	m-n	n-o	o-p	p-q	q-r	r-s	s-t	t-u
誤差率 (%)	0.01	0.02	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00

5. PG を用いて行路長を測定する際の誤差率

急曲線区間に特化した際の誤差率は 3 項に記述したとおり 0.12% 程度であった。一方、駅間単位では 4 項に記述したとおり 0.03% 程度に緩和された。駅間には直線区間と曲線区間が混在しているが、直線区間において踏面中立位置で走行したことが、誤差率緩和に寄与したものと推定する。

また、3.3 項に示すとおり操舵台車後位軸は潤滑条件によるデータのバラつきが小さく安定しており、4.3 項に示すとおり同一区間におけるデータの再現性も高い。以上のことから、R=400m 未満の曲線比率が 50% 未満の駅間の行路長測定を前提とした場合、走行に伴い発生する誤差率を“走行誤差率”と称し、±0.1% 以内とすることは十分妥当であると考察する。

また、2.4 項に記述したとおり、車輪直径が 0.1mm 変化すると約 0.01% の測定誤差が生じる。測定に用いる車軸の左右車輪径は可能な限り車輪径差の小さいものを使用し、車輪径を適切に管理することが前提であるが、車輪径を計測する際の誤差も見込む必要があるため、車輪直径誤差を最大 0.5mm まで許容し、この誤差率を“車輪径誤差率”と称し、±0.05% 加味することとした。

以上の誤差率を加算し、丸ノ内線において PG を用いて行路長を測定する際の誤差率を±0.15% と設定することとした。

図 8 に PG を用いて行路長測定をする際の誤差率の公式を示す。

PG を用いて行路長を測定する際の誤差率 =
 走行誤差率 + 車輪径誤差率

図 8 PG を用いて行路長測定をする際の誤差率の公式

6. まとめ

本検証で用いた車両側の測定条件を以下にまとめる。

- ① 測定に用いた PG 及び演算部は測定に必要な性能を有している
- ② 空転・滑走の影響を排除
- ③ 片軸操舵台車を用い、進行方向後位となる操舵軸のバルスカウントを採用
- ④ 踏面形状が銀丸円弧踏面
- ⑤ 同軸左右車輪直径差が 0.1mm 以内の車輪を使用

上記条件を整え、丸ノ内線 CBTC システムでは、PG 速度センサを用いた行路長測定値をデータベースに定義する位置データとして用いることとし、システム設計を行う上でも測定誤差率を考慮することとした。

なお、今後別路線において PG 速度センサを用いた行路長測定を実施する際、条件が本検証と異なる場合は別途検証が必要であり、シミュレーション結果も参考として路線毎に誤差を設定することが望ましいと考える。

特に本稿は片軸操舵台車を用いた検証結果をまとめたものであるため、引続き非操舵台車を用いた検証を実施することで、PG 速度センサを用いた行路長測定技術が測定手法のひとつとして選択し易い基盤を整えていきたい。

本稿執筆にあたり、試験・検証・解析に多大なご支援ご協力を頂いた皆様に深く感謝申し上げます。今後もレールと車輪の接触解析を通じ、産学連携を密に、安全性向上、業界の発展に尽力する所存である。

7. 参考文献

- *1 遠藤柚季, 道辻洋平, 谷本益久, 今堀修, 志村昂亮「曲線通過時における車軸回転数変動メカニズムの考察」【交通・物流部門大会 TRANSLOG2022】
- *2 岩本厚, 齋藤拓也, 矢野健太, 佐藤安弘, 大野寛之, 森裕貴, 小村吉史, 尾崎拓也, 下川嘉之, 砥出朋史「操舵台車の曲線通過性能評価 (走行抵抗, 省エネ効果の確認)」【鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2014】