

無線式列車制御用通信ネットワークにおける基地局配置最適化

羽田 明生[†]中村 一城[†]公益財団法人 鉄道総合技術研究所[†]

1. はじめに

鉄道では、列車同士の追突や衝突を防止し安全な輸送を実現するために、列車制御システムが導入されている。従来の列車制御システムでは、線路を複数の区間（閉そく区間）に分割し、1閉そく区間に1列車しか在線させないように列車を制御することにより列車運行の安全性を確保してきた。そのため、従来の列車制御システムでは、列車の位置を検知するための軌道回路や、閉そく区間の進入可否を現示する地上信号機など多くの地上設備が必要であった。そこで近年、より少ない地上設備で、柔軟な列車制御を実現するために、無線を利用した列車制御システムの導入が進められている[1]。

無線を利用した列車制御システムは無線式列車制御システムと呼ばれ、車上と地上が互いに列車を制御するために必要な情報を無線で送受信する。無線式列車制御システムでは、軌道回路を用いずに列車が自分で位置を検出して、その位置情報を地上装置に無線で伝送する。各列車の位置情報を受信した地上装置では、それぞれの列車が安全に走行できる区間を計算して、各列車に停止位置を無線で通知する。そして、車上装置では、停止位置、車両性能、線区条件などを踏まえて運転パターンを作成し、列車はその運転パターンに従い走行する。そのため、無線式列車制御システムでは、従来の列車制御システムで必要であった軌道回路、地上信号機などが不要となり、地上設備を削減することができる。また、無線式列車制御システムでは、先行列車の位置情報を踏まえて後続列車が安全に走行できる区間を決定するため、従来の列車制御システムよりも柔軟に列車間隔を制御することができる。しかし、無線式列車制御システムでは、車上と地上間において一定周期（ α 時間）で制御情報を伝送しており、車上で制御情報を所定の回数（ β 回）連続して受信できない場合には、制御システムが伝送の異常を検知して列車を緊急停止させる。そのため、 $\alpha \times \beta$ で定まる車上における通信断に対する許容時間を許容通信断時間と呼ぶと、許容通信断時間内に車上と地上間で無線通信を行うことが難しいような通信

環境では、緊急停止が頻発してしまい、列車運行の安定性を確保することが難しいという課題が存在する。

ここで、障害発生時など許容通信断時間内に車上と地上間で無線通信を行うことが難しい場合に、列車を緊急停止させるのではなく、所定の許容通信断時間を長くして、低速でも運行が可能な運転方式に切り替えることができれば、無線式列車制御システムにおける列車運行の安定性を向上させることができる。本論文では、このような運転方式を縮退運転と呼ぶものとする。縮退運転では、所定の許容通信断時間を長くする代わりに、列車の走行速度を抑える、列車間隔を長くする、などの対応を取ることで、できる限り運行を継続させる。そのため、通信環境の状況に応じて運転方式を切り替えることができれば、無線式列車制御システムの安定性を向上させることができる。

そこで本論文では、通常運転と縮退運転の双方に対応できる無線通信ネットワークを構築するための基地局の配置場所と各基地局で利用する伝送媒体を、鉄道輸送の安全性と安定性を確保した上で、導入費用が最小となるように決定するための問題を定式化する。

2. 基地局配置問題

2.1 問題設定

基地局を設置できる場所の候補は複数あり、それらの候補は所要の通信範囲や周辺環境等によって決定され、与えられているものとする。また、各基地局で利用可能な伝送媒体は、基地局の設置場所により異なるものとし、それらは所与とする。さらに、基地局の設置を計画する線区を長さ等しい複数の区間に分割し、各区間の中心地点を列車位置と呼び、それらは所与とする。ここで、列車が各列車位置を通過するために必要な時間は等しいものとし、その時間は与えられているものとする。加えて、通常運転と縮退運転の各運転方式の許容通信断時間は所与であり、各運転方式ではそれぞれの許容通信断時間以内に少なくとも1つの制御情報を列車で受信するものとする。また、通常運転と縮退運転の各運転方式における通信断時間の総和に対する許容値（許容総通信断時間）が与えられており、各運転方式における通信断時

Radio base station deployment problem in communication networks for radio train control system

[†] Railway Technical Research Institute

間の総和はそれぞれの許容総通信断時間以下でなければならないものとする。

本論文においては、上記の条件を満たした基地局と伝送媒体の配置案の中で、設置費用が最小のものを求める問題を考える。

2.3 定式化

基地局設置候補場所の集合を $D = \{1, 2, \dots, |D|\}$ 、伝送媒体の集合を $M = \{1, 2, \dots, |M|\}$ 、列車位置の集合を $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ とする。また、基地局設置候補場所 $i \in D$ に基地局を設置するとき、その基地局で利用できる伝送媒体の集合を M_i とし、その基地局で伝送媒体 $j \in M$ を利用して無線伝送できる列車位置の集合を K_{ij} とする。さらに、列車位置 $l \in K$ と無線伝送できる基地局設置候補場所 $i \in D$ と、伝送媒体 $j \in M$ の組み合わせの集合を F_l とし、 $F_l = \{(i, j), i \in D, j \in M_i | l \in K_{ij}\}$, $l \in K$ で定める。加えて、 c_i^1 を基地局設置候補場所 $i \in D$ に基地局を設置するために必要な費用、 c_{ij}^2 を基地局設置候補場所 $i \in D$ に設置する基地局で伝送媒体 $j \in M$ を利用するために必要な費用、 t_1 (または t_2) を通常運転時 (または縮退運転時) の許容通信断時間、 t_3 (または t_4) を通常運転時 (または縮退運転時) の許容総通信断時間とする。ただし、各列車が 1 つの列車位置を通過するために必要な時間を 1 単位時間とする。加えて、以下の変数を導入する。

$$\bullet x_{ijl} \in \{0, 1\}, i \in D, j \in M, l \in K \quad (1)$$

基地局設置候補場所 $i \in D$ の基地局が、列車位置 $l \in K$ と通常運転時に使用する伝送媒体 $j \in M_i$ で無線通信する場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet \bar{x}_{ijl} \in \{0, 1\}, i \in D, j \in M, l \in K \quad (2)$$

基地局設置候補場所 $i \in D$ の基地局が、列車位置 $l \in K$ と縮退運転時に使用する伝送媒体 $j \in M_i$ で無線通信する場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet y_{ij} \in \{0, 1\}, i \in D, j \in M \quad (3)$$

基地局設置候補場所 $i \in D$ の基地局が、通常運転時に使用する伝送媒体 $j \in M_i$ を使用する場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet \bar{y}_{ij} \in \{0, 1\}, i \in D, j \in M \quad (4)$$

基地局設置候補場所 $i \in D$ の基地局が、縮退運転時に使用する伝送媒体 $j \in M_i$ を使用する場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet z_i \in \{0, 1\}, i \in D \quad (5)$$

基地局設置候補場所 $i \in D$ に基地局を設置する場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet \sigma_l \in \{0, 1\}, l \in K \quad (6)$$

列車位置 $l \in K$ がある基地局で通常運転時に

使用する伝送媒体と無線通信できる場合は 1、その他の場合は 0

$$\bullet \bar{\sigma}_l \in \{0, 1\}, l \in K \quad (7)$$

列車位置 $l \in K$ がある基地局で縮退運転時に使用する伝送媒体と無線通信できる場合は 1、その他の場合は 0

このとき、無線式列車制御システムにおいて、通信環境の状況に応じて運転方式を切り替えることができるという条件の下で、設置費用が最小となるように、基地局の配置場所、各基地局で使用する伝送媒体を同時に決定する問題は次のような 0-1 整数計画問題に定式化される。ただし、以下の定式化において、 $l_{max}^1 = \max\{1, |K| - t^1\}$, $l_{max}^2 = \max\{1, |K| - t^2\}$ である。

$$\text{Minimize } \sum_{i \in D} c_i^1 z_i + \sum_{i \in D} \sum_{j \in M_i} c_{ij}^2 (y_{ij} + \bar{y}_{ij})$$

Subject to

$$x_{ijl} \leq y_{ij}, i \in D, j \in M_i, l \in K \quad (8)$$

$$\bar{x}_{ijl} \leq \bar{y}_{ij}, i \in D, j \in M_i, l \in K \quad (9)$$

$$y_{ij} \leq z_i, i \in D, j \in M_i \quad (10)$$

$$\bar{y}_{ij} \leq z_i, i \in D, j \in M_i \quad (11)$$

$$y_{ij} + \bar{y}_{ij} \leq 1, i \in D, j \in M_i \quad (12)$$

$$|K_{ij}| \cdot y_{ij} = \sum_{l \in K_{ij}} x_{ijl}, i \in D, j \in M_i \quad (13)$$

$$|K_{ij}| \cdot \bar{y}_{ij} = \sum_{l \in K_{ij}} \bar{x}_{ijl}, i \in D, j \in M_i \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in F_l} x_{ijl} \geq \sigma_l, l \in K \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in F_l} \bar{x}_{ijl} \geq \bar{\sigma}_l, l \in K \quad (16)$$

$$\sum_{l=l'}^{l'+t^1} (1 - \sigma_l) \leq t^1, l' \in \{1, \dots, l_{max}^1\} \quad (17)$$

$$\sum_{l=l'}^{l'+t^2} (1 - \bar{\sigma}_l) \leq t^2, l' \in \{1, \dots, l_{max}^2\} \quad (18)$$

$$|K| - \sum_{l \in K} \sigma_l \leq t^3 \quad (19)$$

$$|K| - \sum_{l \in K} \bar{\sigma}_l \leq t^4 \quad (20)$$

式(1)–(7)

3. おわりに

本論文では、無線式列車制御用通信ネットワークにおける基地局配置を最適化するための問題を取り上げ、この問題を数理的に定式化した。今後は、構築した数理モデルの有用性をシミュレーションにより検証する予定である。

参考文献

- [1] 川崎邦弘, 列車運行の自律化と利便性・効率性の向上, *Railway Research Review*, Vol.76, No.1, pp.12-15, 2019.