積分計算による列車走行シミュレーションの提案

非会員 明日香 昌 (三菱電機(株)産業システム研究所)

正員 駒谷 喜代俊 (三菱電機(株)産業システム研究所)

Train Simulation Method Applying Integral Calculation

Masashi Asuka, Non-member, Kiyotoshi Komaya, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

For train simulations, there is a well-known train movement model. By using the model, the precise running status of a train at the designated values for the velocity, position, and time, must be obtained to analyze the train movement in detail. However, conventional simulation methods cannot calculate the precise status at the designated value, because they only calculate the running status discretely at fixed interval. To resolve this problem, we propose a simulation method that has two features. First, the method utilizes integral formulas. An expression of velocity is formulated that directly gives the precise running status at the designated velocity. With the expression, we can also formulate expressions for position and time. Second, since the designated values for the three variables are given at one time, we build a framework that contains the above three expressions and performs the calculations in the appropriate order to get the running status corresponding to a designated value firstly fulfilled. The proposed simulation method calculates the required running status without considering errors introduced by the method itself. It also uses a smaller number of calculations than conventional methods. The proposed simulation has various uses from planning to control of railways to which the conventional method has been applied.

キーワード：鉄道，列車走行モデル，列車走行シミュレーション，逐次型シミュレーション，積分型シミュレーション

1. はじめに

大規模システムの計画・制御では，実システムを用いての検討が困難であることから，計算機によるシミュレーションが多用されている。こうしたシミュレーションでは，まず実システムの挙動を表現するモデルを作成し，モデルに基づいて計算することにより実システムを模擬する。ここで，シミュレーション結果が現実をどの程度まで忠実に模擬できるかが問題となるが，これには2つの問題が含まれている。1つはモデルと現実との差異であり，もう1つはモデル通りに計算されているかである。

鉄道システムにおいても計算機シミュレーションが多用されている。なかでも列車走行のシミュレーションは計画・制御の基本であり，1本の列車が単独で走行する場合から，複数の列車が運行管理，連動制御，信号制御と相互に作用しながら走行する場合まで，現在では様々な用途に用いられている^{(1)~(7)}。列車の走行状態は位置，速度，時刻の3つの変数で表され，その力学的な挙動は運動方程式によりモデル化できる⁽⁸⁾。これは引張力とブレーキ力の速度特性，走行時の空気抵抗，曲線や勾配に対する抵抗を考慮したもので，車両種別ごとにモデルが確立されている。したがっ

て，列車走行シミュレーションでは，モデルと現実との差異は存在するが，モデル通りに走行した場合を計算することが必要である。

ところで，列車走行は連続的な運動であるが，曲線・勾配区間の始点と終点，信号現示の変化時刻など列車の走行状態を変化させる要因は離散的にしか発生しない。このことより，列車走行シミュレーションでは列車の初期状態を与えて，位置，速度，時刻のいずれかが指定した値になった時の走行状態をモデル通りに計算することが必要である。しかし，従来のシミュレーション方式は3つの変数のいずれかを基準として微小変化後の走行状態を逐次計算するものであり，常に指定値に到達した時の走行状態をモデル通りに計算できる保証がない。ここで，原理的には微小変化の単位を小さくすれば，指定値にかぎりなく近づけることが可能であるが，これは非常に多数の不必要な走行状態を計算しているにすぎない。しかも，走行状態を指定するために用いた変数と微小変化の基準変数とが異なる場合には，微小変化の単位を小さくしても指定値に一致することは保証できず，基準変数を変更する必要がある。このように，列車走行シミュレーションは古くから実用化されているが，モデル通りに走行した場合を計算するという観点からは課題

が残されている^{(9)~(11)}。

本論文では、現在一般に用いられている列車走行モデルでは加減速度が速度の2次式で表される点に着目して、その式を積分した計算式を用いることにより、指定値に到達した時の走行状態をモデル通りに計算する方式を提案する。そして、3つの変数毎に指定値に到達した時の走行状態を計算する手段を所定の順序で適用することにより、3変数のいずれかが指定値に到達した時の走行状態をモデル通りに計算することができることを示す。さらに、提案方式では従来方式のような逐次計算は行わないので、計算回数が減少し実用的であることを具体例を通して説明する。また、従来方式と提案方式の結果を比較し、その差異について考察を加える。

2. 列車走行モデル

列車走行モデルでは、次の運動方程式により列車の力学的な運動を模擬する。

dl/dt = v (1)

dv/dt = α = f1/W - f2 - f3 - f4 (2)

ここで、*l*, *v*, *α* はそれぞれ列車の位置、速度、加減速度である。*W* は列車質量で空車質量および乗車定員、標準的な乗車率から算出される。*f*₁ は引張力あるいはブレーキ力である。*f*₂ は走行抵抗、*f*₃ と *f*₄ はそれぞれ勾配抵抗と曲線抵抗である。以下に、*f*₁~*f*₄ の概要を述べる。

1) 引張力・ブレーキ力 引張力は、モーターにより車両を引っ張る力であり、図1に示すように、速度に対して右下がりの曲線となる。

図1 速度-引張力曲線
Fig.1. Velocity-traction features.

また、ブレーキ力も速度に対する関数で表されるが、通常は全速度領域に対してブレーキ力は一定である。ただし、新幹線のような高速列車では高速領域でブレーキ

力が低下する右下がりの曲線となる。これは高速走行時に強いブレーキ力を加えると滑走する危険があることによる。

このように、引張力とブレーキ力は一般には速度に対する非線型な関数であるため、列車走行モデルでは速度に対して10~20程度の代表点を用いて線形近似する。

f1(v) = (Fk - Fk-1) / (Vk - Vk-1) * (v - Vk-1) + Fk-1 (3)
(Vk-1 ≤ v < Vk)

2) 走行抵抗 列車が走行する時に受ける抵抗を走行抵抗という。走行抵抗は要因が複雑であり実車による試験結果より、トンネル区間・明かり区間別に、次式に示す速度の2次式で近似され、速度に対して右上がりの曲線となる。

f2(v) = R1v^2 + R2v + R3 (4)
R1, R2, R3, 列車毎の定数

3) 勾配抵抗・曲線抵抗 勾配*i*は千分率[0/00]で表され、勾配抵抗*f*₃は、

f3 = i (5)

で近似される。列車が曲線を走行する場合の曲線抵抗は、曲線半径を*R*[m]とすると、

f4 = 800 / R (6)

で近似される。従って、これらの抵抗値は、速度に対して一定である。

さて、以上のことより、加減速度*α*は速度*v*の2次式で近似できることがわかる。

α(v) = av^2 + bv + c (7)

ここで、列車の運転方法は加速、減速、惰行、定速に分類できるが、加速と減速の場合は、それぞれ引張力、ブレーキ力および3種類の抵抗値から上式の係数*a*, *b*, *c*が設定される。また、惰行の場合には引張力とブレーキ力がともに0となり、抵抗値のみから係数が設定される。そして、定速の場合は*a* = *b* = *c* = 0となる。

3. 列車走行シミュレーション

列車の走行状態は位置、速度、時刻の3つの変数で表される。列車走行シミュレーションは与えられた初期状態からモデル通りに列車が走行した状態を求めることに他ならない。列車走行は連続的な運動であるが、加減速度近似式(7)の係数が変化する要因は列車の位置、速度、時刻に応じて離散的にしか発生しない。また、運転方法が変わって

表 1 列車走行条件
Table 1. Conditions for train movement.

項目	内容
路線条件	制限速度とその始点/終点位置
	トンネル区間の始点/終点位置
	勾配区間の始点/終点位置
	曲線区間の始点/終点位置
信号条件	閉塞区間の境界位置
	信号現示の変化時刻と現示速度
運転条件	駅での停止位置
	位置、速度による運転規定

も式(7)の係数が変化したが、これも離散的にしか発生しない。これらの要因は、表1に示す列車走行条件にまとめられる。

列車走行シミュレーションを用いて、制御や計画のための検討を行う場合は、この列車走行条件から位置、速度、時刻を指定して、走行状態を求めることが基本となる。列車走行条件からは位置、速度、時刻のいずれかが指定値に設定される。また、位置と速度というように複数の項目について指定値が設定される場合もある。なお、指定されなかった変数は指定値を無限大とする。以下に、列車走行条件と指定値との関係を述べる。

- 1) 路線条件 路線条件からはいずれも位置が指定される。ただし、制限速度の条件からは位置とともに速度が指定される。これは転てつ器を含む区間や線路の曲線半径が小さい区間を安全に通過するために速度が制限されていることに対応している。なお、トンネル区間、曲線区間、勾配区間では前章で述べた走行抵抗、曲線抵抗、勾配抵抗の値が変化する。
- 2) 信号条件 信号機はある区間の列車速度を制限するものであることから、信号条件からは位置と速度が指定される。さらに信号条件による制限速度は時刻とともに変化するため、時刻の指定も必要となる。
- 3) 運転条件 通常の運転では列車がある位置または速度に到達すると、加速から定速というように運転方法を変えることにより、駅間走行時間を調整している。よって、運転条件からは位置と速度が指定される。

さて、このように列車走行シミュレーションでは3種類の指定値を設定して列車の走行状態を順次求めるが、どの指定値に最初に到達するかは、列車の初期状態によって決まる。例えば、図2に示すようにある区間で速度が指定されている場合、初期状態Xのように初期速度が指定速度よりも低い場合は、区間の終点位置まで加速運転を続ける。一方、初期状態Yのように初期速度がもう少し高い場合は、区間の途中で指定速度に達してしまい、それ以降は定速運転で終点位置まで走行する。また、この図に示した例とは逆に初期速度が指定速度よりも高ければ、区間の終点位置まで減速運転を続ける。このとき、区間の途中で指定速度まで減速すると、それ以降は定速運転となる。

このように、列車走行シミュレーションでは、初期速度と指定速度から運転方法を決定し、最初にいずれかの指定値に到達した時の走行状態を求めることが基本となる。そして、列車走行条件から次の指定値を設定し、シミュレーションを進めることが繰り返される。

図 2 指定値と列車走行
Fig. 2. Designated values and train movement.

4. 逐次型シミュレーション方式

列車走行シミュレーションでは、指定された走行状態をできるだけ少ない計算回数で、与えられたモデル通りに計算することが必要である。従来のシミュレーション方式は、3つの変数のいずれかを基準変数とし、これを等間隔で進めながら、走行状態を逐次計算する。(以下、これを逐次型シミュレーション方式と呼ぶ)。基準変数には通常は距離または時間が用いられ、図3に示すように、いずれかの指定値に到達するまで走行状態の計算が繰り返される。

図 3 逐次型シミュレーション方式の処理フロー
Fig. 3. Flow chart of the conventional simulation method.

逐次型シミュレーション方式では、加減速度は等間隔で計算されるが、これが一定として次の走行状態を計算する。しかし、式(7)から明らかなように、加減速度は速度によって変化するため、逐次計算の間隔が大きいとモデル通りに計算できなくなる。さらに、基準変数は等間隔に進めるので連続的に変化させることができるが、それ以外の変数は離散的にしか変化しない。このため、走行状態を指定するために用いた変数と基準変数とが異なる場合には、指定値と常に一致することは保証できない。例えば、距離を基準変数として、100m 間隔でシミュレーションを行う場合を考える。このとき、列車が180km/hで定速運転していれば、走行状態は2秒毎に計算されるが、18km/hでは20秒毎になる。また、1.8km/h/sで加速しながら100mを走行する間に、停止状態からは20秒で36km/hになるが、初速度36km/hからは約8秒で約50km/hになる。一方、時間を基準変数として、3秒間隔でシミュレーションを行うと、18km/hでは15mしか進まないが、270km/hでは225mも進んでしまう。

このように、逐次型シミュレーション方式で指定値により近い走行状態をモデル通りに求めるためには、計算間隔をより小さくする必要がある。そこで、通常は50mや1秒といった微小な間隔で計算し、さらに求められた走行状態を補正することにより、ほぼモデル通りに計算できるようにしている。しかし、計算間隔を1/nにすれば計算回数はn倍に増加する。しかも、定速運転中や停止中など加減速度や位置が変化しない場合でも、微小間隔で計算することは効率的でない。こうしたことから、逐次型シミュレーション方式では、列車本数が多くなるにつれて、走行状態の計算を膨大な回数だけ繰り返さなければならないという問題点がある。また、基準変数と計算間隔のとり方によって、モデルとの差異がどのように発生するのも明らかにされていない。

5. 積分型シミュレーション方式

本章では、積分計算を用いることにより、列車の走行状態をモデル通りに求めるシミュレーション方式を提案する。

まず、逐次型シミュレーション方式では、モデルでは連続的に変化する加減速度を逐次計算の際に一定として扱っている。しかし、モデルで一定となるのは、加減速度近似式(7)の係数 a, b, c であり、これらは指定値に到達するまで、または引張力・ブレーキ力の近似式(3)が切り替わるまでは変わらない。この点に着目して、これらの係数が一定である区間を1つの単位として、シミュレーションを実行することが可能である。すなわち、列車の加減速度が式(7)に示す速度の2次式で近似されるので、この近似式の係数 a, b, c が一定の時、初速度 v_0 から指定速度 v_t までの走行時間 T_v と走行距離 L_v は、次の積分式で求めることができる。

$$\begin{aligned} T_v(v_0, v_t) &= \int_{v_0}^{v_t} \frac{1}{\alpha} dv = I_{T_v}(v_t) - I_{T_v}(v_0) \\ I_{T_v}(v) &= \frac{2}{r} \tan^{-1} \left[\frac{1}{r} (2av + b) \right] \\ &\quad (b^2 - 4ac < 0 \text{ のとき}) \\ &= \frac{1}{r} \log \left| \frac{2av + b - r}{2av + b + r} \right| \\ &\quad (b^2 - 4ac > 0 \text{ のとき}) \\ &= \frac{-2}{2av + b} \\ &\quad (b^2 - 4ac = 0 \text{ のとき}) \\ &\dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_v(v_0, v_t) &= \int_{v_0}^{v_t} \frac{v}{h} dv = I_{L_v}(v_t) - I_{L_v}(v_0) \\ I_{L_v}(v) &= \frac{1}{ah} \left(-\frac{b}{r} \tan^{-1} \left[\frac{1}{r} (2av + b) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \log |av^2 + bv + c| \right) \\ &\quad (b^2 - 4ac < 0 \text{ のとき}) \\ &= \frac{1}{2arh} \left(-(b-r) \log |2av + b - r| + \right. \\ &\quad \left. (b+r) \log |2av + b + r| \right) \\ &\quad (b^2 - 4ac > 0 \text{ のとき}) \\ &= \frac{1}{ah} \left(\frac{b}{2av + b} + \log |2av + b| \right) \\ &\quad (b^2 - 4ac = 0 \text{ のとき}) \\ &\dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

但し、 $r = \sqrt{4ac - b^2}$ であり、 h は、速度[km/h]、時間[秒]、加減速度[km/h/s]に対する単位系変換パラメータで、 $h = 60 * 60 / 1000$ となる。

上式を速度指定のシミュレーション手段として用いれば、走行状態をモデル通りに計算することができる。しかも、係数 a, b, c が変化しない間は、指定値での走行状態が1回で計算できる。また、時間指定や距離指定のシミュレーション手段も、上式や2分探索法を用いてあらわすことができるので⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、位置や時刻が指定された場合も走行状態をモデル通りに計算できる。このように、指定された走行状態を積分計算を用いて求める方式を積分型シミュレーション方式と呼ぶ。

次に、逐次型シミュレーション方式では、基準変数は等間隔で進むので連続的に変化させることができるが、それ以外の変数は離散的な値をとる点に問題がある。これに対しては、図4に示す順序で、速度、時間、距離を指定したシミュレーション手段を適用して、走行状態を計算する方法が考えられる。

この図では、まず第1に速度指定シミュレーション手段

図 4 積分型シミュレーション方式の処理フロー
Fig. 4. Flow chart of the integral calculation method.

により、指定速度に到達した時の位置と時刻を計算する。これらが、指定位置または指定時刻を越えていなければ、走行状態を表す 3 変数のうち、速度が最初に指定値に到達すると判断できるから、この結果を指定された走行状態とする。そうでなければ、先に他の指定値に到達することになるから、順次、時間指定シミュレーション手段、距離指定シミュレーション手段を用いることにより、指定された走行状態を得ることができる。なお、定速運転の場合は、指定位置あるいは指定時刻での走行状態を直接計算することができる。

このように、積分型シミュレーション方式では、3 種類のシミュレーション手段を高々 3 回用いることにより、最初にいずれかの指定値に到達した走行状態をモデル通りに計算することができる。また、逐次型シミュレーション方式が微小間隔毎に走行状態を計算するのに対して、積分型シミュレーション方式では加減速度を近似する式 (7) の係数が一定の区間を単位として、走行状態を計算する。一般に、式 (7) の係数が変化する回数は、微小間隔での計算回数よりもはるかに小さい。したがって、積分型シミュレーション方式は逐次型シミュレーション方式と比較して、より少ない計算回数で、しかも原理的には走行状態をモデル通りに計算することができる。

6. 逐次型と積分型の比較検証

本章では、逐次型と積分型のシミュレーション結果を比較することにより、逐次型シミュレーション方式において発生するモデルとの差異を検証する。

〈6・1〉加速運転時の走行状態 図 5 に、列車の引張力、質量、走行抵抗に基づいて計算した、都市間高速道路

線用列車 (A) と都市内高密度路線用列車 (B) の速度—加速度曲線の一例を示す。図からわかるように、列車の加速度は、ある速度まではほぼ一定で、それ以降は次第に小さくなる右下がりの曲線で表される。また、(A) の場合、全般に加速度は (B) に比べて小さいが、加速度が低下し始める速度が (B) に比べて高く、低下も緩やかである。

図 5 速度—加速度曲線
Fig. 5. Velocity-acceleration features.

まず、初期速度 10[km/h] から加速運転した時の、時間基準の逐次型と積分型のシミュレーション結果の差異を図 6 に示す。(A) の加速度曲線を用いて、逐次計算の間隔は 0.5[sec]、1.0[sec]、2.0[sec] とし、指定時刻 90[sec]、130[sec]、200[sec]、260[sec] における走行状態を比較した。なお、本章では路線条件、信号条件、運転条件は設定していない。

・ (A) 都市間高速路線の場合
・ 図中 () 内の値は、時間指定の積分型シミュレーションの結果

図 6 走行状態の差異 (時間基準・加速運転時)

Fig. 6. Differences of train state between time-based simulation and integral calculation (acceleration).

差異の値自体は実用上問題とならないが、逐次型と積分型の結果を比較すると、大きく次の 3 つの傾向がわかる。

1) 計算間隔と差異の関係 まず、計算間隔を小さくするにつれて、逐次型と積分型の差異は小さくなり、しかもこれらはすべて 0 に収束している。このことより、積分型は逐次型において計算間隔を無限小とした場合に等しい、すなわち、走行状態をモデル通りに計算しているこ

とが確認できる。そして、逐次型と積分型の差異は、逐次型のモデルに対する差異と考えることができる。

次に、指定時刻が同じ場合、計算間隔を変化させると積分型との差異は直線上に並ぶ。これより、基準変数以外の2変数の差異の割合は、計算間隔に関係なくほぼ一定であることがわかる。

2) 差異の正負 距離と速度の差異は常に正の値である。つまり、逐次型は積分型よりも同時刻において常に遠い位置を高い速度で走行している。これは、図5に示したように、逐次型ではモデルよりも常に大きな加速度を用いて逐次計算を行うためである。

3) 差異の発生状況 上で述べたように、距離と速度の差異は常に同じ符号で、逐次計算によって累積される。このため、指定時刻が大きくなると単調に増加する。ただし、速度の差異は途中で増加から減少に変化する。これは、加速度は速度が高くなると次第に低下して、両方式とも同じ定速状態に近づくためである。また、130[秒]~260[秒]までの高速領域で発生する距離の差異は、130[秒]までの低速領域で発生する差異の約3倍である。この原因は以下のように考えられる。すなわち、低速領域では、加速度の低下がほとんどなく、時間基準で逐次計算すれば走行距離が短いため、モデルとの差異が発生しにくい。逆に高速領域では、加速度の低下が大きく、しかも時間基準の逐次計算における走行距離が長いから、モデルとの差異が発生しやすい。

これらの傾向は、(B)の加速度曲線を用いた図7でも同様である。ただし、加速度の変化が大きいため、差異の発生は大きくなる。

・(B)都市内高密度路線の場合
・図中()内の値は、時間指定の積分型シミュレーションの結果

図7 走行状態の差異(時間基準・加速運転時)

Fig. 7. Differences of train state between time-based simulation and integral calculation (acceleration).

次に、距離基準の逐次型と積分型のシミュレーション結果の差異を図8に示す。(A)の加速度曲線を用いて、逐次計算の間隔は10[m], 20[m], 50[m]とし、指定距離2000[m], 4000[m], 8000[m], 12000[m]における走行状態を比較した。

・(A)都市間高速路線の場合
・図中()内の値は、距離指定の積分型シミュレーションの結果

図8 走行状態の差異(距離基準・加速運転時)

Fig. 8. Differences of train state between distance-based simulation and integral calculation (acceleration).

図からわかるように、計算間隔と差異の関係は時間基準の場合と同様で、この場合も積分型では走行状態をモデル通りに計算していることが確認できる。また、逐次型ではモデルよりも常に大きな加速度を用いて逐次計算を行うため、速度の差異は常に正の値であるが、時間の差異は常に負の値となる。これは、逐次型は積分型よりも同位置において常に短い時間で高い速度に到達することを意味している。さいごに、差異の発生状況については、時間基準と同じ理由により、指定位置が遠くなると時間の差異は単調に増加するが、速度の差異は増加から減少に変化する。また、時間の差異は、時間基準の場合と逆に、低速領域の方が大きい。これは、距離基準の逐次計算における走行時間が低速では長い、高速では短くなるため、高速領域でモデルとの差異が発生しにくくなるからである。

一方、(B)の加速度曲線を用いた図9では、時間基準の場合と同様に、差異の発生が大きくなる。なお、距離基準の場合は低速領域でモデルとの差異が大きくなるため、差異の発生が時間基準の場合よりも顕著である。

・(B)都市内高密度路線の場合
・図中()内の値は、距離指定の積分型シミュレーションの結果

図9 走行状態の差異(距離基準・加速運転時)

Fig. 9. Differences of train state between distance-based simulation and integral calculation (acceleration).

〈6・2〉 減速運転時の走行状態 都市間高速道路用列車 (A) と都市内高密度道路用列車 (B) の速度-減速度曲線の一例を図 10 に示す。(A) の場合、高速領域では減速度が小さく、速度 70[km/h] 付近から、次第に大きくなる。一方 (B) では、基本的にはブレーキ力は一定となっているが、低速領域では走行抵抗がほとんどないので、減速度も若干小さくなる。もっとも、どちらの場合も、加速度に比べて速度による変化は小さい。

図 10 速度-減速度曲線

Fig. 10. Velocity-deceleration features.

まず、初期速度 260[km/h] から減速運転した時の、時間基準の逐次型と積分型のシミュレーション結果の差異を図 11 に示す。(A) の減速度曲線を用いて、逐次計算の間隔は 0.5 [秒]、1.0 [秒]、2.0 [秒] とし、指定時刻 70 [秒]、100 [秒]、130 [秒]、150 [秒] における走行状態を比較した。

・ (A) 都市間高速道路路線の場合
・ 図中 () 内の値は、時間指定の積分型シミュレーションの結果

図 11 走行状態の差異 (時間基準・減速運転時)

Fig. 11. Differences of train state between time-based simulation and integral calculation (deceleration).

計算間隔と差異の関係および差異の正負については、図 6 に示した加速運転時と同じ傾向である。また、図 10 に示したように、逐次型ではモデルよりも常に小さな減速度を用いて逐次計算を行うため、積分型よりも同時刻において常に遠い位置で高い速度で走行している。そして、指定時刻が大きくなると距離と速度の差異は単調に増加する。

なお、(B) の減速度曲線を用いた場合は、減速度がほとんど変化しないため、ほとんど差異が発生しない。

次に、距離基準の逐次型と積分型のシミュレーション結果の差異を図 12 に示す。(A) の減速度曲線を用いて、逐次計算の間隔は 10 [m]、20 [m]、50 [m] とし、指定距離 4000 [m]、5200 [m]、6000 [m] における走行状態を比較した。

・ (A) 都市間高速道路路線の場合
・ 図中 () 内の値は、距離指定の積分型シミュレーションの結果

図 12 走行状態の差異 (距離基準・減速運転時)

Fig. 12. Differences of train state between distance-based simulation and integral calculation (deceleration).

図からわかるように、計算間隔と差異の関係および差異の正負については、図 8 に示した加速運転時と同じ傾向である。差異の発生状況は図 11 の時間基準の場合と同様である。ただし、距離基準の場合は減速度の変化が比較的大きい領域で速度の差異が大きくなる。また、(B) の減速度曲線を用いた場合は、時間基準の場合と同様に差異がほとんど発生しない。

〈6・3〉 検証結果 積分型シミュレーションの結果は逐次型において計算間隔を無限小とした場合に等しく、モデル通りに計算していることが確認できた。逐次型シミュレーション結果とモデルとの差異は、逐次計算の際に用いる加減速度がモデルと一致しないことに帰着できる。具体的には、加減速度の速度特性から、逐次型は積分型よりも同時刻においては常に遠い位置で高い速度に、また同位置においては常に短い時間で高い速度に到達する。差異の値自体は実用上問題とならないが、例えば都市内高密度道路用列車の加速運転のように、加減速度の速度変化が大きい領域では注意が必要である。

次に、逐次型において計算間隔を小さくすれば、時間基準でも距離基準でも、モデルとの差異を小さくできる。しかし、計算間隔を小さくすれば計算回数が増える。走行状態が同じ場合は、距離基準の方が計算回数は増える。例えば、6.1 節に示した 10 [km/h] から 260 [km/h] まで加速する場合、時間基準では 2 [秒] 間隔で 130 回、距離基準では 50 [m] 間隔で 240 回となる。一方、積分型では 14 回の積分

計算でこの走行状態を求めることができる。

これらのことより、積分型シミュレーション方式は逐次型のようにモデルからの差異や補正を考慮することなく、十分少ない計算回数で、走行状態を計算できる手法と言える。さらに、逐次型では路線条件、信号条件、運転条件の取扱方法によってもモデルとの差異が発生する。しかし、これらの条件を考慮に入れた場合でも、積分型では図4に示した処理フローにより、指定された走行状態をモデル通りに計算できる。

さて、以上の検証は単独での列車走行を扱ったが、複数の列車を対象とする場合には、信号現示速度が列車相互の位置関係や進路の設定状態で決まる。このため、従来は各列車の走行状態を微小時間単位で計算するのが一般的であった⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、各列車の閉そく区間ごとの完全進入時刻と進路開通時刻から信号現示速度の時間的な遷移情報（信号遷移情報）が作成できるので、これを用いれば、列車単位および駅単位のシミュレーションを相互に依存しない形で実施できることが示されている⁽²⁾。そこで、信号遷移情報を用いたシミュレーションに積分計算を適用すれば、信号現示は離散的にしか変化しないので、複数列車の走行状態も、十分少ない計算回数でモデル通りに計算できると考えられる。

7. おわりに

本論文では、列車走行の積分型シミュレーション方式を提案した。提案方式では、積分計算を利用することにより、列車の走行状態を与えられたモデル通りに計算することができる。また、シミュレーションに要する計算回数も従来の逐次型シミュレーション方式と比較して減少するので、十分に実用的である。そして、路線条件、信号条件、運転条件を考慮する場合でも、指定された走行状態をモデル通りに計算できる。したがって、提案方式は従来方式が用いられてきた様々な分野において代替可能である。

また、提案方式を用いて、逐次型シミュレーション方式で発生するモデルからの差異について検証し、その特徴を明らかにした。差異の値自体は実用上問題とならないが、例えば都市内高密度路線用列車の加速運転のように、加減速度の速度変化が大きい領域では注意が必要である。

今後は、提案方式を用いた列車運行シミュレータの実用化を目指す。また、列車の停止制御のような即応性と安全性が要求されるシステムへの、本方式の適用を検討していく予定である。

(平成12年03月13日受付, 同12年10月02日再受付)

文 献

- (1) 荒屋真二, 曾根悟:「都市型軌道輸送システムの列車群制御とシミュレーションによる特性解析」, 電学論 C, Vol. 101-C, pp. 97-104 (1981)
- (2) 明日香昌, 駒谷喜代俊:「ミクロモデルとマクロモデルによる列車運行シミュレーションの結合」, 電学論 C, Vol. 116-C, pp. 1134-1140

- (1996)
- (3) S. Murata, A. Kawabata, K. Tashiro, T. Takaoka:「Train control method for high speed and high density railway systems」, COMPRAIL 94, Vol. 2, pp. 437-444 (1994)
- (4) T. Nagata, S. Murata, Y. Naka, O. Sakashita, N. Shimizu:「A train operating method with real-time adaptability to performance variations of rolling stock」, COMPRAIL 98, pp. 793-804 (1998)
- (5) 木村彰:「時刻-位置パターンを用いた電気車における定時運行制御の提案」, 電学論 D, Vol. 119-D, pp. 942-949 (1999)
- (6) 門馬直子, 戸次圭介, 高野たい子, 小熊賢司, 川島治仁, 岩崎明美, 秋山弘之, 藤原隆:「鉄道総合シミュレータ New Jumps」, 第30回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 211-215 (1993)
- (7) 金山道王, 藤原裕二, 三吉京, 蘇武和男, 関義朗:「鉄道列車制御シミュレータの開発」, 第34回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 84-87 (1997)
- (8) 運転理論研究会:「運転理論」, 日本鉄道運転協会
- (9) 鳥居尚史, 明日香昌:「列車走行シミュレーション方式の考察」, 平成10年電気学会全国大会論文集, Vol.4, pp. 395-396 (1988)
- (10) 明日香昌, 駒谷喜代俊:「積分型の列車走行シミュレーション」, 平成11年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 205-208 (1999)
- (11) 明日香昌, 駒谷喜代俊:「積分計算を用いた列車走行シミュレーション方式」, 平成12年電気学会全国大会論文集, Vol.3, pp. 970-971 (2000)

明日香 昌 (非会員) 1965年1月6日生。1990年3月京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、産業システム研究所ビル・交通システム開発部第4グループにて、列車運行管理や列車保安制御等の、鉄道システムに関する研究・開発に従事。情報処理学会会員。

駒谷 喜代俊 (正員) 1954年1月13日生。1977年3月京都大学工学部電気工学科卒業。1979年3月同大学大学院工学研究科(電気工学専攻)修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、産業システム研究所に勤務。工学博士。システム工学、知識工学の交通システムなどへの応用に関する研究に従事。電気学会、計測自動制御学会、情報処理学会、IEEE会員。