作業者の動きを中心とした施工モデルの表現方法

施工シミュレーションモデルに関する研究

MODELING FOR WORKER'S MOVEMENT IN CONSTRUCTION PROCESS

Simulation models of a construction site

嘉納 成男^{*1}

Naruo KANO

The objective of simulation is to understand the content of a construction plan and to clarify the problems of the plan to be improved, by simulating the progress before the construction start. This paper proposes a modeling method of simulating workers' movement at construction site, and suggests incorporating algorithmic planning methods into the simulation model. Then, using a case study, the author verifies the validity of these modeling methods.

Keywords: Simulation, Worker's Movement, Building Construction, Transportation, Algorithmic Planning

シミュレーション, 作業者の動き, 建築工事, 運搬, アルゴリズム計画

1. 緒言

施工シミュレーションの目的は、工事着工前において、工事計画に基づき進捗状況を再現することによって、工事計画の内容を理解するとともに問題点や改善点を摘出することにある。前報¹⁾までに示した施工シミュレーションでは、工事計画に基づいた作業方法や順序関係を施工モデルとして作成し、工事進捗をコンピュータ内で再現する方法を示した。

工事現場における作業者の動きには移動や運搬がある。作業箇所間の移動、資材の小運搬や間配り、台車等の手押し移動などは、工事全体から見ると微細な事柄ではあるが、工事を円滑に進める上で重要な作業である。しかし、工事着工前では、一部の作業を除いては、作業者の移動や運搬についての詳細な内容までの計画は為されておらず、事前にこれを施工モデルに組み込むことが出来ない。また、作業者の動きは、その時々工事現場の状況（資材の仮置き状況、部材の取付け状況など）に大きく左右されるため、これを事前に施工モデルとして組み込むことにも無理がある。

この問題を解決するには、シミュレーション実行中に、作業者の動きを予想して計画（作業者の移動経路など）として立案し、施工モデルにこれを反映させてシミュレーションを実行する必要がある。

工事現場の作業者の移動や運搬の動きをシミュレーションとして解析した研究は少ない。移動・運搬について森ら²⁾は理論式を作成しその時間を予測している。また、石岡ら³⁾は狭隘な作業場所における作業員間の干渉が生産性に与える影響をシミュレーションで調べている。避難時などの群集歩行の研究は多いが、作業者の移動は目標地点を有しているとともに、同様な移動・運搬が繰返し行われる特徴がある。

本報では、作業者の動きを施工シミュレーションで再現するためのモデル化の方法を提案するとともに、アルゴリズム計画法を

施工シミュレーションに組み込むことを提案した。そして、事例の作業工程についてこれらの方法論を用いて、その有用性を検証した。

2. 工事現場における作業者の動き

工事現場における作業者の動きを表現するには、作業者の作業領域や移動経路に着目して作業者がどのような動きをしているかを空間的に把握する必要がある。作業者が行う行為は、移動型作業と非移動型作業に分けられる。移動型作業は作業者が位置を変えながら作業を行う特徴があり、その時系列的な作業者の位置が工程上重要な意味を持つ。他方、非移動型作業は他の作業に影響を与えない定まった領域（作業領域）内を動き回りながら作業を行う特徴がある。

移動型作業を整理すると以下の3つに分類することが出来る。

- (1) 移動: 現在地点から目標地点に移動する。徒歩の場合が殆どであるが、フォークリフト等を運転して移動する場合もある。台車などで荷を運びそれを降ろした後に空の台車を押して戻る移動もある。
- (2) 運搬: 資材を持って歩行、資材を積載した台車を押して移動、資材を積んだフォークリフトを運転しての移動などがある。
- (3) 運搬直後の作業: 資材を運搬した後にその資材を置き場に置く作業、又は資材を運搬した後にその資材をその場で取付ける作業などがある。本研究では運搬直後に行う作業は運搬と合体して移動型作業として捉えている。

3. 作業者の空間的位置のモデル化

3.1. 作業者と空間との関係

作業者の動きは、移動型作業の場合は移動経路、作業者が仮置きする資材の位置、取付ける部材の位置などと密接に関連する。このため、作業者の動きを捉えるには、作業者が時々刻々の様な作業

^{*1} 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Dr.Eng.

をしているか、とともに、工事現場の何れの位置で作業をしているか、また何れの径路を移動しているのかを明確に施工シミュレーションで表す必要がある。

資材の仮置きや運搬においては、資材の大きさが作業に影響する。仮置きの場合は資材の大きさによって置く場所が異なり、運搬の場合は運搬で通り抜けられる径路に差異が生じる。本研究では、作業者が占有する空間を作業者の Foot 領域、資材が占有する空間を資材の Foot 領域、各作業が実施する際に占有する空間を作業領域として予めその寸法を定義し、施工モデルに組み込むことを行った。

Foot 領域は、図1に示す如く、床面に投影される領域を意味する。仮置き時、運搬時、取付け時など、それぞれの時点で異なった資材の姿勢の Foot 領域を定義することによって、その用途に合った Foot 領域を用いることが出来る。(例えば、仮置き時 Foot 領域、運搬時 Foot 領域、取付け時領域)

Fig. 1 Foot Print

3. 2. セルによる現場空間の表現

作業者が部材の取付け作業を行う作業領域、移動や運搬を行う径路が利用可能か否かは、作業工程に大きく影響する。工事現場は、工事中の建物の状況が時々刻々変化するとともに、仮設足場やステージの掛け外しのタイミングによって、作業床の使用は制限される。

本研究では、作業者が作業や移動する「床」、また資材を仮置きや設置する「床」の有無が工事の進捗に重要な意味を有すると考え、工事現場における「床」を正方形に分割したセルを用いて、その位置をセル単位で把握した。

本研究におけるセル分割は以下の特徴がある。

- (1) 床がある所(将来床が設置される所を含む)を平面的にセルで分割し、その位置をセル番号で特定できる様にした。なお、セルに高さ情報を付与することによって、段差や傾斜のあるセルとして定義出来、必ずしも床は水平面である必要はない。
- (2) セル構造は複数の種類を用意する。例えば、1階床、2階床など建築部分の各床を表すセル構造、建物周辺の枠組み足場の作業床を表すセル構造、建築床に設置された作業ステージ床を表すセル構造などがある。
- (3) 異なったセル構造の間の移動径路を確保するために、それぞれのセル構造の橋渡しをする転移空間を用いる。
- (4) セル構造は、作業者の移動や作業領域の精度を保つ様に本研究では 25cm 幅に細分化している。セル数が膨大となることを防ぐため、「四分木構造」によるセルの階層構造を用いて、必要な場所のみセルを細分化することとした。

3. 3. 四分木構造と隣接ポインター

3. 3. 1. 四分木構造

広大な工事現場のすべてを微小なセルで表現すると膨大な数(セル寸法 25cm、敷地 50mx50m の敷地の場合、200x200=4 万個)のセルが必要になり、コンピュータの中央メモリーに与える負荷が大きい。このため、セルは、先ず空間セルの最上位の空間管理を行うマトリ

ックスを用意し、その下に 1m 角のセルを配置し、図2に示す如く、四分木構造で分解していく構造としている。この構造を用いることによって、工事現場の状況を巨視的(1m セル)に捉えるとともに、微視的(25cm セル)に捉えることが出来る。

3. 3. 2. 隣接ポインター

作業者は、移動や運搬によって工事現場を移動することになるが、施工モデルではセルを単位に移動することになり、各セルを前後左右、斜め 4 方向に移動する。また、工事中の建物床空間、周辺足場床空間、各種作業ステージ床空間などの複数のセル構造に分かれており、それぞれは層を為している。このため、上下の層の間の移動、本設階段や仮設階段等を用いた異なるセル構造間の移動などを効率的に行うことが出来る様にセルにポインターを持たせて空間をモデル化した。セル間の繋がりをポインターで定義するには、図3で示す如く、各セルから左右前後に隣接するセルへ到達するポインターを設定した。異なったセル構造の間では、転移空間セルに一旦ポインターを渡しそこから他のセル構造にポインターを繋げる方法を用いた。これによって、上下層に設置した階段等の移動、足場作業床から本設建物床への移動などを考慮にいて、最短経路を見つけ出すことが出来る。

Fig. 2 Structure of Cells

Fig. 3 Pointers Between Cells

3. 4. セルの状態属性

セル間の移動の有無は通過するセルの状態によって決まる。例えば、部材が取付けられているセルや資材が仮置きされているセルでは、これを通過できない。また、安全上の理由から同じ作業領域で重複して作業を実施することは出来ない。この空間の状態の違いを、セルの状態属性として以下の如く定義した。

- (1) 開放空間：作業や移動・運搬に支障を与えない床面を有する空間(ST=0)
- (2) 閉鎖空間：資材が置かれており立ち入りが出来ない空間(ST=1)
- (3) 一時占有空間：作業者が移動中であり、他の作業者等が一時的に侵入出来ない空間(ST=3)
- (4) 作業中空間：作業が実施されており、他の作業者等が長時間侵入出来ない空間(ST=4)
- (5) 予約空間：ある目的で使用する予定(作業、移動のための一時占有空間)が事前に予約されており、他の作業者等が侵入出来ない空間(ST=9)

4. 繰返し作業工程のモデル化

4. 1. 繰返し作業工程の編成

作業者の移動や運搬を施工シミュレーションに組み込むには、作業者の位置をどの程度の精度で把握するかによって、施工モデルの詳細度が決まってくる。作業者の移動は、概ね 0.5~1.0m/秒であるため、作業者の位置精度を 1m~3m 程度以内にしたい場合、シミュレーションの時間間隔を 1 秒~3 秒間隔程度にする必要がある。こ

の様に工程を詳細にモデル化すると、作業者が行う繰り返し作業工程についても施工モデルとして表現する必要性が出てくる。作業者が行う繰り返し作業は、ほぼ同様な部材を用いるものの、詳細にみると、部材の取付け位置は各回で異なり運搬する経路も異なっている。

図4は繰り返し作業工程をモデル化している。図4では、資材置き場にある資材を用いて一連の作業を行うことによって、部材1を設計位置に取付けている。作業14(工程最後の作業)と作業11(工程最初の作業)の間に作業者ノードを配置し、作業工程に従事する作業者(作業者1)を定義する。作業者1はInputアローで繰り返し作業の最初の作業である作業11に投入される。また、作業14が終了すれば作業者1は1回分の繰り返し作業を終了し、Outputアローを通じて再度作業者ノードに戻ってくる。これによって、作業者1は、再度作業11を実施することが出来る。

Fig. 4 Model of a Repetitive Work Process

図4において、Transアローはその入向側の作業に従事する作業者が作業終了後、出向側の作業に移動して作業を続けることを意味している。すなわち、作業工程の最初の作業である作業11に作業者を投入すれば、その後は、Transアローを通じて後続の作業に次々と引き継がれ最後の作業である作業14に到達し、Outputアローによって、作業者ノードに再度戻されることになる。

4.2. 作業者の作業工程の選択

建築工事では、作業者が複数の班に分かれて、様々な作業を分担して工事を進めていくことは多い。例えば、部材の取付けにおいて三つの作業工程(①部材を載せた台車の運搬、②部材の取付け、③空になった台車の搬出置き場までの搬出)がある場合、各作業班はいずれかの作業工程を分担して作業を行うことになる。このような場合、各作業班が何れの作業工程を分担すれば良いかについては、工事着工前の工事計画で定めるには無理があり、現場の状況を見ながら職長や作業者が適時分担を決めることになる。

Fig. 5 Model of Selecting a Work Process

このため、施工シミュレーション実行中に作業班が自律的に作業工程を選択する仕組みが必要になる。これを可能にするには、Gate選択肢を用いる。図5は、3つの作業工程を示している。作業者が行うべき作業工程を選択するには、Gateノードから出向するアロー上の属性「選択条件」が満足する作業工程に進むこととした。この仕組みによって、作業者はGate選択肢において、自分が行う作業工程を条件に合わせて選択して実施することが出来る。

5. 作業者の移動型作業のモデル化

5.1. スクリプトによる表現

移動型作業は、前章で述べた如く3つの作業項目(移動、運搬、運搬直後の作業)がある。これを詳細にモデル化するには、前報までに示したノードとアローによる施工モデルとともに、スクリプトを用いて詳細な作業ロジックをモデル化する。

5.2. 移動のモデル

5.2.1. 移動の行為

移動は以下に示す3つの行為から構成される。

- (1) 現在地点と目標地点の最短経路の探索
- (2) 最短経路に従って現在地点から目標地点への移動
- (3) 移動中の経路に障害が発生した場合、最短経路の再探索

5.2.2. 移動のスクリプト

現時点から目標地点までの移動は、直線に移動することが望ましいが、工事現場における建築物の状況や仮設されている資材の置き場などの障害物を迂回して進む必要がある。この迂回する最短経路を求めるには、A-Starアルゴリズム(後述)^{注1)}を用いている。施工モデルでこのアルゴリズムを用いて最短経路を求めるには、関数

Fig. 6 Flow Chart of Moving

「SearchAndSetShortestPath」を用いる。作業者は移動に先立ってこの関数を実行することによって最短経路を求めて、この経路に沿って、シミュレーションの各期で順次移動する。

移動における注意点は、移動を開始した時点で求めた最短経路上にその後新たに資材が置かれたり、他の作業者が入り込んだりすると、移動経路を通過が出来なくなる。このため、移動経路上に障害が発生した場合には、その時点で再度移動経路(障害を回避する経路)を探索した後、別の経路で移動を続ける仕組みを採用した。移動の詳細な手順は、図6の如くなる。

作業者が移動をするには、以下に示すスクリプトを定義してモデル化する。

- (1) 移動速度を作業者の属性「作業速度2」に与える。

作業速度2: ?運搬作業者&移動速度

- (2) 移動する目標地点を与える。下記では、パネル@搬入置き場の置き場領域の中心を目標地点としている。

開始時実行-1: SetSpecValue(?運搬作業者; 目標地点;

GetRangeCenter(パネル@搬入置き場&置き場領域 3r))

- (3) 最短経路の探索を行い、その経路を移動経路Idとして登録する。なお、仮置き場などに多くの資材が仮置きされると、この場所のセルの状態属性が0(開放空間)以外の値となる可能性が高くなるため、下記ではパネル@搬入置き場の置き場領域の中ではセルの状態属性を無視して移動できる様にしている。

開始時実行-2: SetSpecValue(?運搬作業者; 移動経路Id;

SearchAndSetShortestPath(?運搬作業者; 現在地点;

建築物床層；目標地点:建築物床層；

(パネル@搬入置き場&置き場領域 3r))

(4) 最短経路の探索で求められた経路の総距離を求めて、これを作業者の移動作業の作業量とする。

開始時実行-3: SetActivityTaskVolumeByShortestPath(

?運搬作業者；移動経路 Id；現在地点；目標地点)

(5) 移動作業を開始すると、各シミュレーション期において、移動作業の作業量を作業速度に準じて減じていく。このとき、置き場領域 3r では空間属性に関係なく移動出来る様に指定している。

作業中実行-1: SetSpecValueOnTaskVolumeByPathMove(

?運搬作業者；移動経路 Id；現在地点；目標地点；

(?運搬作業者&!置き場領域 3r))

(6) 移動を実行する時点で、移動できない事態が生じた場合には、その時点で再度最短経路を求め、新しい移動経路 Id とする。そして、新しい移動経路に従って、移動作業の作業量を設定し直す。(次期のシミュレーション期には、新しい移動経路 Id を用いて移動する。)

作業中実行-2: IfThen (If(?運搬作業者&!経路障害=True);

Do(SetSpecValue(?運搬作業者；移動経路 Id；

SearchAndSetShortestPath(?運搬作業者；現在地点；

建築物床層；目標地点:建築物床層；

(?運搬作業者&!置き場領域 3r)))；

SetActivityTaskVolumeByShortestPath(?運搬作業者；

移動経路 Id；現在地点；目標地点):2) ;1)

5.3. 運搬を表すスクリプト

5.3.1. 運搬を構成する行為

運搬は以下に示す 7 つの行為から構成される。なお、[最短経路の探索]、[移動]は前項 5.2.2. と同じスクリプトとなる。

1.[資材の選定]

(1) 運搬する資材を選択する。

2.[目標地点の仮置き場スペースの確認・予約]

(2) 目標地点において、資材が仮置き出来るか否かを調べる。

(3) 仮置き場における資材スペースの予約

3.[最短経路の探索] (前項 5.2.2. と同じ)

(4) 現在地点と目標地点の最短経路の探索

4.[資材の把持]

(5) 資材を把持する。

5.[移動] (前項 5.2.2. と同じ)

(6) 目標地点に向けて作業者が移動することによって、資材が運搬される。

(7) 移動中に経路に障害が発生した場合は、最短経路探索

6.[解放]

(8) 資材を解放する。

7.[運搬直後の作業]

(9) 資材の仮置き

(10) 資材の取付け

5.3.2. 運搬資材の選定

運搬をするには、仮置き場に置かれている資材を以下に示す 2 種類の方法で選定する。(図 7 参照)

(1) 仮置き場に置かれている先頭の資材から選定する。

(2) 作業票から取付けるべき部材の ID を読み込み、部材に使用

する材料品番に適合する資材を選定する。

図 7.a は先頭の資材から順に運搬する場合を示し、図 7.b は作業票を用いる場合を示している。

a. Selecting a Panel of First-In b. Selecting a Panel Specified in Work Ticket

Fig.7 Model of Selecting a Panel

5.3.3. 目標地点の仮置き場スペースの確認と予約

資材を運ぶ先の仮置き場のスペースの有無を確認するには、以下に示す関数「TrySearchAndReserveOpenArea」を用いる。

開始条件-1:If (TrySearchAndReserveOpenArea(

(パネル仮置き場&置き場領域 3r)；

(パネル仮置き場&最大仮置き Foot 領域 3 r)))

予約で使用するスペースの大きさは、資材の最大 Foot 領域 3r を用いている。この条件が成立して運搬が開始されれば、下記のスクリプトを用いて資材置き場のスペースの予約・確保を行う。なお、資材は運搬後に予約したスペースの領域に置かねばならないため、その位置を?運搬作業者の属性「仮置き場領域 3r」に記録している。

開始時実行-4: SetSpecValue(?運搬作業者；仮置き場領域 3r；

SearchAndReserveOpenArea(

(パネル仮置き場&置き場領域 3r)；

(\$パネル 1&仮置き Foot 領域 3 r)))

5.3.4. 最短経路の探索

最短経路の探索は、前項 5.2.2. と同じになるため割愛する。

5.3.5. 資材の把持（資材の保持）

運搬作業を開始後、最初に行う行為は、作業者による資材の把持である。この行為は実際の運搬作業でも行う行為であるが、施工シミュレーションでは、把持によって資材オブジェクトを作業者オブジェクトに取付けて、作業者が移動すると資材も作業者に伴って移動する仕組みを採用している。?運搬作業者が?資材を把持する行為をモデル化するには、関数「AttachAnInstance」を用いる。

開始時実行: AttachAnInstance(?資材；?運搬作業者)

5.3.6. 資材の運搬

資材の運搬は、作業者が運ぶべき資材を把持した後、作業者が目標地点に移動すれば、資材は自ずと運ばれることになる。このため、運搬に必要なスクリプトは、前項 5.2.2. と同じとなるため割愛する。

5.3.7. 資材の解放

運搬作業が終了した時点で、関数「DetachAllInstances」を用いて作業者に取付いている資材を作業者から外す(解放)。なお、関数「SetValue」では、開放した資材集合（把持が複数の場合もある）から資材 1 つ取出して、それを変数「\$パネル」に与えている。

終了時実行-1:DetachAllInstances (?運搬作業者)

終了時実行-2: SetValue('\$パネル:Item(sysDetached 集合；
1))

5.3.8. 運搬直後の作業

A. 資材を仮置きする場合

作業員から取外された資材を、予め予約した仮置き領域 3r に仮置きする。資材を仮置き場に置くとその Foot 領域が資材で占有されるため、資材の Foot 領域を開関「PlaceAnInstanceOnArea」を用いて、セルの状態属性を閉鎖空間にする。

終了時実行-1:PlaceAnInstanceOnArea(\$パネル;
?運搬作業員&!置き場領域 3r)

図 8 は、資材を運搬後に仮置きする施工モデルを示している。

Fig. 8 Model of Transporting and Placing a Material at Stockyard

B. 資材を運搬直後取付ける場合

取外された資材は、既報で示した方法でモデル化した取付け作業に Input アローで繋げることによって、運んで来た資材を運搬直後に取付ける作業に引き継ぐことが出来る。

6. アルゴリズム計画

6.1. 作業員の動きをモデル化するアルゴリズム計画

施工シミュレーションを用いて、作業員の動きを再現するためには、その動きを決定するアルゴリズムを施工モデルに組み込むことを行い、シミュレーション実行時に自律的に作業内容を制御する方法を採用した。本項では、7 章で示す間仕切り壁パネル取付け作業の事例で必要になる以下の 3 つの計画アルゴリズムを示し、それに従って作業員の動きをシミュレーションで再現した。

- (1) 作業員の移動（運搬）径路の探索
- (2) 資材の置き場への配置
- (3) 部材の取付け順序

6.2 作業員の移動径路

6.2.1. 空間セルに基づく移動径路

作業員の移動や資材を運搬する径路については、出発地点と目標地点との間の最短径路を求めた。移動径路は前項で示したセルの中を移動することとし、開放空間の属性を持つセルを移動できる。壁や仮置き資材等が置かれている空間セルは閉鎖空間となっているため、移動径路には含まれない。また、移動では空間セルに区切られた空間を横、縦、斜め 45° の方向に進むことが出来るとした。

6.2.2. 最短径路の探索の方法

最短径路を求めるには、工事現場に仮置きされている資材や柵などを回避して、移動する必要がある。工事の進捗によって資材の置かれている位置が常に変化し、また安全柵も日々移動する。このため、工事現場の中の移動する可能な径路は定まったものではなく、工事の進捗に合わせて常時変化する。このため、移動可能な径路をネットワークとして作成して最短径路を見つけ出す Dijkstra's 法を用いることは出来なく、径路の制約が常に変化する状況において効率的に最短径路を求める手法である A-Star アルゴリズム^{注1)}を用いた。

6.3. 資材置き場の配置

作業員が資材を運搬する場合、運搬先の仮設置場の中に仮置きされることになるが、その正確な位置を具体的に決める必要がある。資材をどの位置に置くかについては、その時点の仮置き場のスペースの空き状態に左右される。

Fig. 9 A Method to Layout Materials

置き場位置を決定するアルゴリズム計画としては、様々な方法が考えられるが、本報では、以下に示す比較的単純な詰め込み解法を用いてこれを実施している。(図 9 参照)

- (1) 仮置き場を特定した後、長方形の 4 隅の位置のいずれから開始する。
- (2) 仮置きする資材の Foot 領域に合わせて、その位置に資材が置けるか否かを調べる。置けない場合は、X 軸（又は Y 軸）方向に距離 Lx だけ Foot 領域を移動した後、その位置に資材が置けるか否かを再度調べる。
- (3) 上記(2)を繰り返して行き、仮置き場の端部に達した場合は、X 軸（または Y 軸）に沿って戻り、Y 軸（または X 軸）上を距離 Ly だけ移動する。
- (4) (2)を再度実行する。

本報での詰め込みの解法は単純な方法であるが、詰まらない場合は資材を 90° 回転するなどの方法もある。このアルゴリズム計画を用いることによって、施工シミュレーションにおいて運搬される資材の仮置き場の位置を入力情報として与える必要が無くなり、施工モデルの作成は簡易になる。

6.4. 部材の取付け順序

6.4.1. 部材の取付け順序の決定

取付ける部材の位置や使用する材料品番等は、設計情報に含まれる。しかし、その取付け順序は指定されていない。取付け順序を決めないまま、施工シミュレーションを実施すると、部材データの入力順序で部材が取付けられてしまうため、実際には不可能な取付け順序になってしまう可能性もある。取付け順序を事前に検討して入力段階で指定する方法もあるが、部材の量が膨大にある場合その手間は無視できない。このため、本施工シミュレーションでは、部材の取付け順序を決めるアルゴリズムを考案した。

6.4.2. 部材の取付け順序決定のアルゴリズム

A. 資材の運搬径路を考慮した取付け順序

部材 i を取付けるために仮置き場から資材を最短径路で運搬することを考えると、その径路上に他の部材 j が既に取付けられていると、部材 i の運搬に支障が出る。このため、このような場合には、部材 i は部材 j に先行して取付けることとした。

Fig. 10 Network Model of the Installing Works of Components

これを求めるため、部材を取付ける前に、全ての部材について、その最短径路上に位置する他の部材の有無を調べて、その部材との順序関係を設定した。この順序関係によって、図 10 に示す如く部材

の取付け順序ネットワークを作成することが出来る。

B. 取付け順序ネットワークから非対称巡回行列の作成

上記で求めた部材取付け順序ネットワークのみでは、あちらこちらの部材がバラバラに取付けられていくことになるため、部材間を渡り歩く距離（i 番目に取付ける部材の位置と i+1 番目に取付ける部材の位置との距離の総和）を最小化することによって、部材の取付け位置が纏まって取付いていく様になる。

図 10 のネットワークを隣接行列として表すと、図 11. a の如くなる。この隣接行列から到達行列を作成すると、図 11. b となる。求めた到達行列の右上の三角形の領域は、要素 ij（部材 i と部材 j との順序関係の到達可能性の有無を意味している）が 0 となっている部材は、部材 i と部材 j との間には間接的にも順序関係が存在しないことを意味しており、いずれを先に取付けてもよい部材である。

Fig.11 Matrices of Sequence

この関係を示すために、到達行列の右上の三角形の領域の要素 ij が 0 の要素については、要素 ij=1、要素 ji=1 を入れることによって、図 11. c に示す非対称巡回行列を作成することが出来る。

図 11. c に示す非対称巡回行列は、セールスマンが巡回する都市が複数ありその都市間の距離が与えられるとき、すべての都市を非対称巡回行列のアローの方向にのみ巡回して最小の距離となる順路を求める問題となる。

C. 非対称巡回セールスマン問題の近似解法

本研究では上記問題の解法としてヒューリスティック法を用いて近似解を求めた。採用した方法は、セールスマン問題の解法である Nearest neighbor method を用い、巡回路の改善図るために近傍法に基づく k-opt 法の近傍の入れ替えを発生させて近傍最適解の発見を行った。上記の方法は、厳密な最適解を求めることは出来ないが、これまでの実験では概ね妥当な近似的最適解が得られている。

D. 部材の取付け順序の付加

上記で示したアルゴリズムを用いるのみでは、部材の取付け方法に起因するすべての順序関係を考慮することは出来ない。例えば、狭隘な作業場所では都合の良い取付け順序などがある。このため、取付け方法の容易さなどを考慮する必要がある場合には、この順序を付加的に入力時に施工モデルに与えることとした。

7. 適用事例

7.1. 作業の概要

7.1.1. 間仕切り壁パネルの配置

事例とした作業は、間仕切り壁パネルを取付ける工程である。パネルは工場加工されたパネルであり、床と天井に予め固定されたランナーに取付ける作業である。間仕切り壁パネルを取付ける工事は、約 23m x 50m の研究棟の一つの階の工事を想定した。図 12 は、同建物の平面図上に間仕切り壁パネルの配置とその部材 ID を示してい

Fig.12 Layout of Panels to be Installed

る。なお、壁 GH3、壁 GH4 は、パネル仮置き場からエレベータ前置場、及び台車置き場の間の運搬径路に位置しているため、このシミュレーションには含まれていない。

パネル材料は、取付け個所の寸法に合わせて工場加工された 2400A 型（高さ 3000mm、梁下用）、2400B 型（高さ 3500mm）、2400BD 型（高さ 3500mm、ドア付き）、1200B 型（高さ 3500mm）、特殊寸法の 1560 型（高さ 3000mm、梁下用）の 5 種類がある。各パネル材料の用途は、表 1 に示す如く、各研究室の廊下側壁には 2400BD 型（ドア付き）+1200B 型+2400BD 型を配置する。また、研究室の境の壁には 2400A 型を 3 枚、柱と廊下側壁の間に 1560A 型を 1 枚使用する。なお、建物端部の研究室の廊下側は 2400BD 型を使用する。

Table1 Panel Types and Material ID

軸 (Axis)	間仕切り壁 (Partition Wall)	材料品番 (Material ID)
X	廊下側 (Wall at Corridor Side)	L2400B + L1200B + L2400BD
	廊下端部 (Wall at the End of Corridor)	L2400BD
Y	部屋側柱間 (Wall between Rooms)	L2400A x 3
	廊下側柱間 (Wall at Corridor Side)	L1640A

7.1.2 作業工程の内容

間仕切り壁パネルの作業工程は、以下の 3 つの作業内容から構成される。

[パネル搬入置き場からパネル仮置き場への資材台車の運搬工程]

- (1) パネル仮置き場からパネル搬入置き場まで移動する。
- (2) パネル搬入置き場から資材を積んだ台車をパネル仮置き場まで運搬する。
- (3) パネル仮置き場に資材台車を仮置きする。
- (4) パネル仮置き場にて、台車から資材を荷解きする。

[パネルの取付け工程]

- (5) パネルの取付順序を決定する。取付け順序は、取付け場所までのパネルの運搬に支障がなく、且つ場所が近いパネルを連続して取付けることを考慮して、作業票に反映させる。
- (6) 作業票に示す取付けパネルで使用する材料品番に対応するパネルを取り出す。
- (7) パネルをパネル仮置き場から取付位置まで運搬する。
- (8) パネルの取付を行う。
- (9) パネル仮置き場まで戻る

[パネル仮置き場から台車置き場への空台車の運搬工程]

- (10) 荷が載っていない空の台車を探し、その台車を台車置き場に運搬する。
- (11) パネル仮置き場まで戻る。

表 2 は、主要な作業の作業期間と移動・運搬の移動速度を示している。

7.1.3. 作業の空間的制約

作業工程を実施するには
以下の空間的制約がある。

(1) 置き場における資材や台車の配置スペースの制約（パネル搬入置き場、パネル仮置き場、台車置き場）	資材台車運搬工程
(Transporting Panel Track)	資材台車仮置き選定作業
(Selecting Place)	30
		資材台車仮置き作業
(Placing Panel Track)	60
		資材台車荷ほどき作業
(Unloading Panel Track)	120
		資材台車運搬戻り移動
(Returning-1)	—
	パネル取付工程
(Installing Panels)	パネル選別作業
(Selecting Panels)	10
		パネル取り出し作業2
(Taking Panels)	30
		パネル運搬作業2
(Transporting Panels)	—
		パネル取付作業
(Installing Panels)	300
		パネル取付戻り移動
(Returning-2)	—
	空台車搬出工程
(Transporting Vacant Track)	空台車取り出し作業1
(Take-Out Vacant Track)	60
		空台車運搬作業
(Transporting Track)	—
		空台車搬出戻り移動
(Returning-3)	—
	台車の揚重
(Lifting Track)	資材台車揚重作業
(Lifting Panel Track)	200
		空台車揚重作業
(Lifting Vacant Track)	200
- (2) 移動・運搬の径路上に存在する障害物（柱、壁、取付けられた間仕切壁パネル）の制約
- （資材台車の運搬、パネルの運搬、空台車の運搬、戻り移動）
- (3) 作業における作業領域占有の制約（パネル取付け作業）

作業工程 (Work Process)	作業名 (Work)	作業期間 (秒) (Duration, Sec)	移動速度(m/秒) (Speed, m/Sec)
資材台車運搬工程 (Transporting Panel Track)	資材台車取り出し作業1 (Taking-Out Panel Track)	60	---
	資材台車運搬作業1 (Transporting Panel Track)	---	0.5
	資材台車設置選定作業 (Selecting Place)	30	---
	資材台車仮置き作業 (Placing Panel Track)	60	---
	資材台車荷ほだき作業 (Unloading Panel Track)	120	---
	資材台車運搬戻り移動 (Returning-1)	---	0.8
パネル取付工程 (Installing Panels)	パネル選別作業 (Selecting Panels)	10	---
	パネル取り出し作業2 (Taking Panels)	30	---
	パネル運搬作業2 (Transporting Panels)	---	0.5
	パネル取付作業 (Installing Panels)	300	---
空台車搬出工程 (Transporting Vacant Track)	パネル取付戻り移動 (Returning-2)	---	0.8
	空台車取り出し作業1 (Take-Out Vacant Track)	60	---
	空台車運搬作業 (Transporting Track)	---	0.6
	空台車搬出戻り移動 (Returning-3)	---	0.8
台車の揚重 (Lifting Track)	資材台車揚重作業 (Lifting Panel Track)	200	---
	空台車揚重作業 (Lifting Vacant Track)	200	---

Fig.13 Space Constraints of Transporting Works

7.1.4. 作業で使用する資材

作業で使用するパネル材料は、作業階へ台車に積載して運ばれ、台車から降ろした後、部材に指定された材料品番に合致するパネル材料を選んで、取付け位置まで運び取付けることになる。

表 3 は、各台車が積載しているパネル材料の一覧を示している。

Fig15 Mode of Transporting and Unpacking Panels

台車には材料品番毎に 3, 5 枚のパネルが積まれている。なお、同

じ品番のパネル材料には連番(!01～!99)を付けて区別している。

7.2. 施工モデル Table3 Attributes Tracks and Panels

7.2.1. パネル取付け

順序の立案

パネルの取付け順序は、施工モデルには入力されておらず、シミュレーション開始後に前項で示したアルゴリズムック計画を用いて順序を立案した。

先ず、取付けるべき部材 ID、部材に使用する材

料品番、部材の取付け位置を記した作業票を準備し、それを作業票リストに入れておく。次に、作業「パネル順序化作業 0」を行い、関数「PlanOfInputSequence」を実行して部材の取付け順序を求め、この順序を各作業票の属性「InputPriority」に書き入れる。次に、作業「パネル順序化作業」によって、属性「InputPriority」が高いものから、順にノード「優先順序作業票」に登録していく。

これによって、作業票は取付け順序が早いものから並ぶことになる。

Fig.14 Mode of Planning the Sequence of Panels

7.2.2.1 階から作業階への資材台車の揚重

パネル材料を積載した台車は、1階から作業階まで揚重する。本

シミュレーションでは、資材台車はシミュレーション開始後、15分間隔で2台ずつ到着することとした。(図15の左側に示す)

7.2.3. パネル搬入置き場からパネル仮置き場への資材台車の運搬工程
エレベータ前のパネル搬入置き場まで揚重された資材台車は、パネル仮置き場まで台車ごと運搬される。運搬工程では、先ず資材台車を取り出して、その後パネル仮置き場入口まで運搬する。そして、

に運搬されたならば、適時搬出されるものとした。(図17参照)
7.2.7. 作業者による作業工程の選択
前項までに示した3つの作業工程は2人1組の作業班で実施し、その組を5班用意した。各班の作業者には、その作業内容を事前には決めず、作業工程を適時自律的に選択して行わせることとした。この選択は、作業全体が円滑に進む様に行う必要がある。例えば、

Fig. 16 Model of Installing Panels

Fig. 17 Model of Transporting Vacant Tracks

資材台車の配置位置を求めた後、その位置に向けてパネル仮置き場の中を運搬する。そして、資材台車を配置したならば資材の荷解きをして、パネル材料を取り出せる状態にする。(図15参照)

7.2.4. パネルの取付け工程
パネルの取付け工程では、先ず作業票に示す部材が使用する材料品番に適合するパネルを仮置き場から選定し、そのパネル材料を取り出し取付け位置まで運搬する。運搬したならば、そのパネルを取付ける。そして、作業者は再度パネル仮置き場に戻る。(図16参照)

7.2.5. パネル仮置き場から台車置き場への空台車の運搬
パネル仮置き場からパネルが取り出されると、パネルを収納している台車が空になる。空の台車がパネル仮置き場に置かれていると、その配置スペースが占有されるため、空の台車はパネル仮置き場から台車置き場に運搬する必要がある。

これを行うには、先ずパネル仮置き場に空の台車が存在するか否かを調べ、もし存在すればその台車を台車置き場まで運搬する。そして、運搬した作業者は再度パネル仮置き場まで戻る。(図17参照)

7.2.6. 台車置き場から1階置き場への空台車の揚重工程
作業階の台車置き場に置かれた空台車は順次1階まで搬出する。本シミュレーションでは、空台車の搬出は、空台車が台車置き場

Fig. 18 Model of Selecting a Work Process

資材台車をパネル仮置き場に運ばなければ、パネルが無くなりパネルを取付けられないため、パネルの取付けよりも資材台車の運搬の優先順位は高い。また、空台車の運搬が為されなければ、パネル仮置き場には空台車が溢れ新しい台車を置き場に運搬できないため、資材台車の運搬よりも空台車の運搬の優先順位を高く設定している。作業者が何れの作業工程を行うかの判断基準は以下の如くなる。

- (1) 資材台車のパネル仮置き場への運搬工程 (優先順位: 1位)
選択条件①: 資材台車がパネル搬入置き場に置かれている。
選択条件②: パネル仮置き場に台車を置けるスペースがある。
- (2) 空台車の運搬工程 (優先順位: 2位)
選択条件①: 空台車がパネル仮置き場に置かれている。
- (3) パネルの取付け工程 (優先順位: 3位)
選択条件①: パネル仮置き場にパネルが置かれている。

図18はGateノードを用いて、以上の判断基準で自律的に作業工程を選択する施工モデルを示している。

7.3. シミュレーションの実施
本シミュレーションは、ExcelのVBAを用いて開発し、各工程表はExcel表を出力している。なお、施工モデルはVisioを用いた。シミュレーション間隔は、作業者の移動速度が0.5~1.0m/秒で

あることを考慮して、0.5 秒として実施した。実行では、先ず、パネルの取付け位置に基づいて、その取付け優先順序を求めた。次に資材台車が作業階に 15 分に 2 台の間隔で到着する様にした上で、3 つの作業工程について 5 つの作業班を用意した。各班は作業の進捗を見ながら、三つの作業工程（前述）のいずれかを選択しながら作業を実施する。このため、各作業班は、どの様な作業を実施するかについては、事前には決まっておらず、作業の進捗の状況を考慮しながら、各作業班は自律的に作業工程を分担して作業を進めている。

7. 4. シミュレーションの結果

7. 4. 1. 全体作業期間

シミュレーションを実施した結果、全体作業期間は、2 時間 48 分 10 秒であった。シミュレーションに要した演算時間は約 120 分間である。計算時間を要した理由は、作業数が多く、作業者の移動・運搬毎に行う最短経路探索で 1 回 5 秒程度を掛かるためである。

7. 4. 2. パネルの取付け順序

72 枚のパネルの取付け順序を(1)から(72)の番号を付して図 19 に示した。取付けは、そのパネルの運搬経路の障害となるパネル仮置き場から見て手前にあるパネルよりも奥のパネルが先に取付けられる順序になっていることが分かる。また、前回取り付けられた部材の近傍の部材が次に取付けられる順序であることが分かる。

7. 4. 3. 作業者の移動経路

作業者の移動・運搬は、資材台車のパネル搬入置き場からパネル仮置き場への運搬（緑破線）、パネルの運搬と取付け（赤破線）、及び、空台車の運搬（青破線）の 3 種類がある。この移動経路を示すと、図 19 の如くなる。G 通りのパネルが取り付けられると台車の運搬経路はそれを避けて、廊下側に変更になっていることが分かる。

部材の運搬経路が他の部材の上を横断している場合は、その部材の取付けは横断している部材よりも早く取付けられていることが、図に示した取付け順序番号からも確認することが出来る。

Fig. 19 Order of Panels to be installed

7. 4. 4. 全体工程表

図 20 は全体工程を示す。上段に作業別の工程表を、下段に作業班別の工程表を示している。作業別工程表では、作業の対象となる部材又は台車の名称をボックス内に示すとともに、色で区別している。また、作業班別工程表では、作業班が行う作業名称をボックス内に示すとともに色で区別している。色数が限られているため色は重複しているが、同じ色は同じ要素または同じ作業を意味している。

作業別工程表では、資材台車運搬、パネル取付け、空台車運搬の 3 つ工程について、複数の班（5 班）に分かれて同時並行的に実施されていることが分かる。パネル取付け工程は最も時間が掛かる工程であるため、5 つの班がほぼ常時取り付け作業を行っている。し

かし、資材台車運搬及び空台車運搬も実施しなければ新しいパネルがパネル仮置き場に到着しないため、2 班はパネル取付け工程をしながら、適時他の二つの工程についても分担していることが分かる。

なお、作業者は部材の取付け順序に従って部材を取付けようとするが、材料は材料品番毎に纏まって台車で揚重されるため、部材の材料品番に合致するパネル材料がまだ届かない場合もある。このため、一部の部材（例えば、B23、BC3!02 など）は取り付け順序が計画よりも遅れて取付けられている。

作業班別工程表では、作業者が班に分かれて 3 つの工程について、定まった分担作業は決めずに、適時手分けして作業を実施していることが分かる。作業班全体の稼働率は、78.4%であり、各工程についての作業者の延べ就業時間は、資材台車運搬（2 時間 6 分）、パネル取付け（8 時間 2 分 20 秒）、空台車運搬（49 分 20 秒）であった。

8. 結言

本報で提案した方法論に基づいて実施した間仕切り壁パネル取付け工程における試行によって、以下の事項を確認することが出来た。

- (1) 作業者の移動経路探索、資材の仮置き位置の選定、部材取付け順序の決定などについて、アルゴリズムック計画を採用し、シミュレーション実行中に自律的な判断機能を含ませた自由度の高い施工シミュレーションを可能にした。
- (2) 複数の作業班が工程の進捗を考慮しながら、分担する作業工程を適時選択して作業を進めることを可能にした。
- (3) 工事現場の空間をセルによって表現することによって、作業者の最短経路、部材の取付け順序などに必要な工事現場の地理的な情報をモデル化した。
- (4) 現場に運び入れた共通的なパネル材料を作業票の指示に従い、部材が指定する材料品番に該当するパネル材料を順次取付けることを可能にした。

注

注 1) A-Star アルゴリズム：現在地点と目標地点を与えることによって、その間のメッシュを辿る最短経路を求める方法。メッシュで地図を与えることによって、予め経路ネットワークを作成する必要がない。

注 2) Dell Precision T5600, CPU:Xeon E5-268W, 3.10GHz, 32GB, Windows10 Pro, 64Bit

参考文献

- 1) Naruo KANO : MODELING FOR ACTIVITY-ORIENTED CONSTRUCTION PROCESS, Simulation models of a construction site, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), no. 736, pp. 1569-1579, 2017. 06
 - 2) Hajime Mori, Takashi Shiohara: Investigation of State of Transportation at Construction Sites, Report of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No. 23, pp. 10-14, 1981
 - 3) Hiroaki Ishioka, Naruo Kano: Analysis of Work Interface Using 3D Space Model, Analysis of Area Occupation and Time Series Expression of Result, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, F-1, pp. 1305-1306, 2010
- 石岡宏晃, 嘉納成男 : 3 次元空間データを用いた作業干渉の解析に関する研究、作業による空間の占有状況の解析と結果の時系列的な表現手法、日本建築学会大会学術講演梗概集, F-1, pp. 1305-1306, 2010

MODELING FOR WORKER'S MOVEMENT IN CONSTRUCTION PROCESS

Simulation models of a construction site

Naruo KANO ^{*1}

^{*1} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Dr.Eng.

1.Introduction

The objective of simulation is to understand the content of a construction plan and to clarify the problems in the plan to be improved, by simulating the progress in accordance with a construction plan before the construction start. This paper proposes a modeling of simulating workers' movement at construction site, and suggest incorporating algorithmic planning methods into the simulation model. Then, using a case study, the author verifies the validity of these modeling methods.

2.Workers' movement at a construction site

The author describes the characteristics of moving-type work in a building construction, and points out that geometrical planning of a site is indispensable for grasping workers' movement and transportation of materials by workers.

3.Modeling of workers' geometrical position

In order to indicate geometrical position at a site as a model, quadtree-structured 'Cells' are used. Cells represent floors where workers are moving and materials are transported. Thus, the accurate position of workers at each time can be grasped by workers' movement among these Cells.

4.Modeling of Repetitive work Process

The author mentions that the interval of simulation of workers' movement and transportation of materials should be 1 to 3 seconds, and suggests that modeling of repetitive work process is necessary in order to model building construction at such a small interval. The author also presents the method of representing repetitive work process using a model, together with the method of autonomously selecting a repetitive work process while taking work progress into consideration.

5.Modeling of Moving-type work

Here presents a method of modeling moving-type work. In addition to a model using 'nodes' and 'arrows' in the past study, this method uses 'scripts' to describe detailed actions during work. Thus, it becomes possible to autonomously search the shortest path of workers' movement, and accurately simulate actions such as holding or releasing materials to be transported.

6.Algorithmic planning

Planning Items such as Workers' moving path, layout of materials at a yard, and sequence of installation of components are not clearly decided at the construction start time, therefore the system should make a plan autonomously and incorporate the content of these plans into a simulation model. The methods of algorithmic planning are defined for planning of workers' autonomous actions required in the case study in Chapter 7.

7.Case study

A building with many individual research rooms is used for this case study, which focuses on a process of installing partition panels. This process consists of the following three repetitive work process; (1) transporting panel tracks, (2) transporting and installing panels, and (3) transporting vacant tracks. The author develops a model that incorporates algorithmic planning into simulation, and makes a work scheduling chart as well as a manpower scheduling chart. Then, the author verifies that simulation enables workers to proceed with actions by autonomously to be required to complete works.

8.Conclusion

This paper verified that the progresses of workers' movement and transporting works are simulated accurately by the proposed simulation models

(2018年2月3日原稿受理, 2018年3月26日採用決定)