IoT対応多目的ファジイランダム建設工程計画分散並列解法

富山県立大学電子・情報工学科　　　　　　指導教員：奥原浩之
1515028　杉山桃香

1 はじめに

1.1 本研究の背景

現在、少子高齢化による労働者人口の減少は 1 つの社会的課題となっている. 国立社会保障・人口問題研究所の調査で、2030 年には、人口の 1/3 近くが 65 歳以上の高齢者になると推計されている. そして、このまま対策がないと、GDP の減少は避けられない.

この問題の対策として、限られた資源で最大の利益を得ることが求められる. 今回はその対策の一つである「最適なスケジューリングによる生産性の向上」に着目した.

1.2 本研究の目的

本研究では、最初に作業員の標準作業時間、機械の処理時間などを取得しグラフ分析を行う. そこで、得られたグラフを元に最適化問題として定式化する. 更に、計算の高速化のため遺伝的アルゴリズムを並列計算環境で解く.

最終的には、作業の進行状況に対してそのつど最適な計画を立て直し、作業員同士で共有できるような、リアルタイム性の高いシステムの開発を目的とする.

2 住宅建設における工程計画の最適化

2.1 工程管理の現状

少子高齢化による労働人口の減少で生産性の向上や作業効率の向上が注目されるなか、建設・土木工事でも、「経済性」「迅速性」「確実性」という、3 つの要素間の適切なバランスをとりあげた工程計画の研究が非常に重要になってきている. 家づくりは長い期間をかけて行うため、進むほどに後戻りが難しくなるため、最初に全体の大まかな流れをつかんでおくことが大切だ.

現状、日本の住宅建設にかかる費用は米国や他国に比べると高いといわれており、その原因の約 50 %は生産性の悪さが問題だとされている. 住宅生産の各作業の中にはフレーミングのように、米国に近い生産性をあげている部分もあるが, 全体としては、作業間の連携を含めて、システムが著しく遅れている.

2.2 課題

近年、これまでのバーチャート式の工程計画を中心とした施工計画策定法にかわって、ネットワーク理論を中心とした PERT や CPM 等による施工計画策定方法となえられ、一部では既に実用化されつつある. しかし、これらの手法、特に CPM 手法を導入した工程計画の策定を試みてきたが、これら一連の研究をとおして得られた主な問題点がある. 大きく分けて 4 つある問題を図 1 に示す.

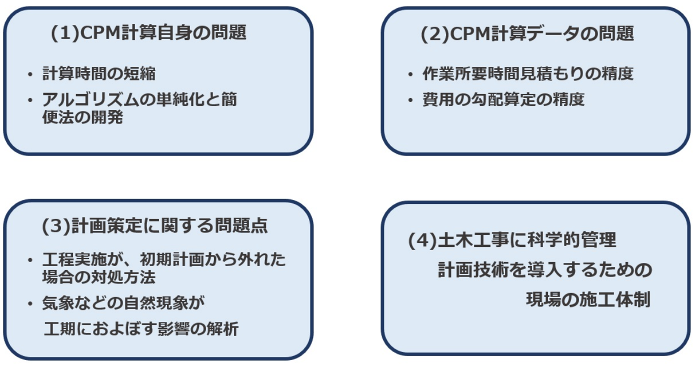

図 1　CPM 手法を導入するときの問題点

特に本研究では、図 1 に示したの問題のうち、「計算時間の短縮」「作業所要時間見積もりの精度」「気象などの自然現象が工期におよぼす影響」の 3 点に着目し、それらを考慮した最適なスケジュールを定めることを目指す.

3 問題の記述

3.1 PERT

PERT は (program evaluation and review technique) の略称で 1957-1958 年にかけて、米国海軍、Booz Allen & Hammilton 社 (コンサルティング会社), ロッキード社が共同して開発したプロジェクト管理手法の 1 つである.

大きなプロジェクトは，その中に多くの小プロジェクトを含み，また小プロジェクトもそれより一連の作業によって構成される．それらの作業を一律に管理しようとしたとき，管理のための費用や手間の効率性を考えることは困難である．しかし、すべての作業が日程の管理にとって，同じように重要であるとは言えない. なぜならば，これらの作業は，相互に依存関係を持っており，勝手な順序で仕事を行うことができないからである．

つまり，どこか日程的にボトルネックになる作業とそうならない作業が存在していることになる．そこで,「ボトルネックになる作業群に着目して管理を行えば，効率的な運用が可能になる」というのが PERT の基本的なアイディアである．

そのボトルネックになる作業を見出すために、ネットワークを用いた分析がよく用いられる. そのためにはまず、プロジェクト・ネットワークと呼ばれるプロジェクトを構成する要素 (作業) の順序関係を図で表現する.

ネットワークを構成する要素となる工程・先行アクティビティ・作業時間を表 1 に示す.

表 1　住宅建設におけるアクティビティの先行関係と作業時間

工程	先行アクティビティ	作業時間 (日)
a. 整地	—	2
b. 基礎	a	4
c. 骨組み	b	10
d. 電気配線	c	7
e. 外部配管	c	4
f. 内部配管	e	5
g. 屋根	c	6
h. 外壁	g	7
i. 化粧ボード	d, f	8
j. 外部塗装	e, h	9
k. 床張り	i	4
l. 内部塗装	i	5
m. 外部設備	j	2
n. 内部設備	k, l	6

表 1 中の先行アクティビティとは，そのアクティビティを実施するために，終了していなければならない作業を指す．

PERT では，先行関係をネットワークによって表現する．そのプロジェクト・ネットワーク図の書き方には 2 種類あり，一つは端点にアクティビティを対応させる方法 (activity on node; AoN) と，一つは枝にアクティビティを対応させる方法 (activity on arc; AoA) がある．今回は、AoN 型のプロジェクト・ネットワークを用いる.

プロジェクト・ネットワーク図は有向ネットワークで表され，一つの端点が一つのアクティビティに対応し，枝の向きがアクティビティの間の先行関係に対応する. 実際に、表 1 の要素を用いて、住宅建設におけるプロジェクト・ネットワークを描いたものを図 2 に示す.

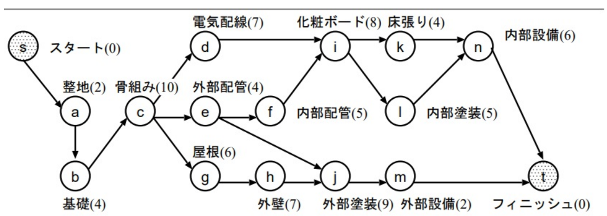

図 2　プロジェクト・ネットワーク

図２の括弧内の数字は作業時間を示している. スタートとフィニッシュはダミーとして付け加えたアクティビティのため, ここでの作業時間は 0 となる.

3.2 プロジェクトの時間分析

このように、アクティビティの先行関係と作業時間が既知の場合、プロジェクト内の作業に関する様々な時刻・時間を計算することが可能である.

今回は、作業の最早開始時刻 (earliest start time) と最遅完了時刻 (latest finish time) を計算することで、計画の中のクリティカル・パス (critical path) を導出する.

最早開始時刻とは、先行するすべてのアクティビティが全く遅滞なく遂行された場合に，該当するアクティビティを開始できる時刻のことである．この時刻より、そのアクティビティを早く開始することはできないことを表す．アクティビティj の最早開始時刻 E_j は式 (1) で求めることができる.

$$E_j = \max_{i \in P(j)} E_i + d_i \tag{1}$$

プロジェクトのスタートを表す端点から，順次前方に向かって (時間の進む方向へ)，ゴールを表す端点まで，式 (1) を用いて計算を行う.

最遅完了時刻とは、後続のすべてのアクティビティの最早開始時刻を遅らせることなく，該当するアクティビティをもっとも遅く完了することができる時間のことである．もし、この最遅完了時刻を超えてしまった場合は，プロジェクト全体の完了が遅れる．. アクティビティj の最遅完了時刻 L_j は式 (2) で計算できる.

$$L_j = \min_{i \in P(j)} E_i - d_i \tag{2}$$

最初に決まるのはフィニッシュの最遅完了時刻で，これはその最早開始時刻と一致する．その後，プロジェクトのフィニッシュを表す端点から，順次後方に向かって (時間を遡る方向へ)，スタートを表す端点まで，式 (2) を用いて計算を行う.

クリティカル・パスとは、最早開始時刻に作業時間を加えた時刻が最遅完了時刻が一致しているアクティビティに相当する端点を結ぶとスタートからフィニッシュまでの経路のことである. クリティカルパス上のアクティビティに遅延が生じた場合，直ちにその分だけプロジェクトの終了時間が遅くなる．したがって，クリティカルパス上のアクティビティを重点的に管理する必要がある.

すべての端点について，最早開始時刻 Ej と 最遅完了時刻 Lj を求めたら，下に示す式 (3) を満たす端点を探す．これらの端点を結ぶと必ずスタートからフィニッシュまでの経路を得ることができる. このようにして計画内のクリティカル・パスを導出することができる.

$$E_j + d_j = L_j \tag{3}$$

表１に示した住宅建設における、最早開始時刻と最遅完了時刻から導出したクリティカル・パスを図３に示す.

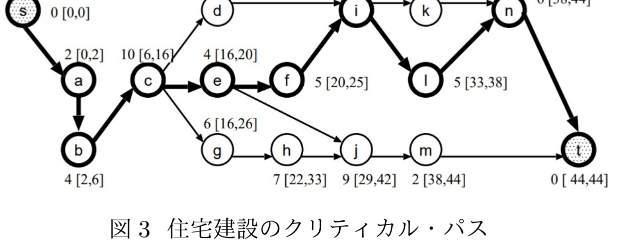

図３ 住宅建設のクリティカル・パス

4 定式化

4.1 CPM 線形計画問題

PERT では，作業時間に着目してプロジェクトの管理を行う. アクティビティの先行関係をネットワークで表現することで，クリティカル・パスや最早完了時刻などの情報を得ることができた.

ここまでの問題は、アクティビティに要する時間が既知でかつ確定的な場合を仮定し、時間のみを考慮した問題だった. しかし、現実では、作業時間を事前に確定することは難しく、時間のみでなく、他の資源 (費用・人・労働時間) も考慮して計画を立てる必要がある.

そこで、今回は資源とプロジェクトの完了時間にトレードオフの関係があると考え, 資源配分と作業時間の両方を考慮した最適化問題を考える. その時に、アクティビティにどれくらいの資源を追加するのがもっとも効果的かという問題を解く手法として CPM(Critical Path Method) を用いる.CPM とは、資源配分と作業時間の間に線形な関係を仮定して，アクティビティへの最適な資金配分を求める手法のことである.

CPM では，すべてのアクティビティについて時間費用関数 (timecost curve) をつくる．これは，図４のようなグラフで表される．グラフの右側の点が標準点 (normal point)，左側の点が限界点 (crash point) と呼ばれる．標準点は，追加的な費用をかけずにアクティビティを達成できる時間とその場合の費用に対応しており，限界点は追加的な費用をかけることによって, 達成できる最短の時間とその費用に対応する. このように、CPM では，作業時間と費用の間に線形な関係を仮定し,，期限以内にプロジェクトを終了するための最小費用を求める問題を線型計画問題として定式化することが可能である.

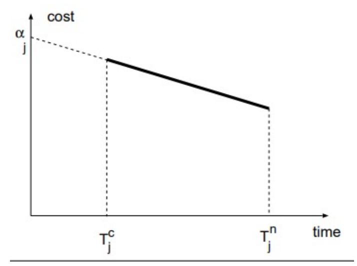

図４ 時間費用関数

プロジェクトにおけるアクティビティの集合を V とおき, アクティビティj ∈ V ごとに，標準点（Tnj ），限界点（Tcj ）とし，時間費用曲線の傾き（β j），切片（α j）が与える. さらに，アクティビティの間の先行関係を表す枝の集合を E とおく. このとき、決定変数はアクティビティの作業時間 xj (j ∈ V) および開始時刻 yj (j ∈ V) である.

スタートとフィニッシュを表す端点が s，t だったとして，プロジェクト全体の所要時間を T 以内に押さえるために投入する費用を最小化する問題は，次の図５ようになる.

$$\begin{array}{ll}
\min & \sum_{j \in V} (\alpha_j + \beta_j x_j) \\
\text{s.t.} & y_s = 0, \quad x_s = 0, \quad x_t = 0 \\
& y_j + x_j - y_k \leq 0, \quad jk \in E \\
& y_t \leq T \\
& T_j^c \leq x_j \leq T_j^n, \quad j \in V \\
& y_j \geq 0, \quad j \in V
\end{array}$$

図５ 単目的線形計画問題

4.2 多目的計画問題

ここまでの問題は作業期間を制限とした最小費用を求める単目的問題だった. 本研究では、これに目的関数を増やし、多目的計画問題にする. 追加する目的関数として年間の労働時間を取り上げる.1 年間を 30 日間単位 (1ヶ月) で区切り、各期間の中で作業にあたる 12ヶ月 (360 日間) に対して、各期間＝１、12 に対する各作業 j=1、14 の必要労働時間 L としたとき、目的関数である年間総労働時間は式 (4) で表される. 更に, それに対しての制約式は式 (5) となる.

$$\min \sum_{l=1}^{12} \sum_{j=1}^{14} L_{lj} x_j \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{7} L_{lj}x_j \leqq\ 4800, |l = 1, ..., 12 \tag{5}$$

5 ファジイランダムの適用

5.1 目的

ファジィランダム変数は確率空間からファジィ集合への写像として定義され、ファジィ数が基準となる変数である. 不確実性・不確定性を同時に表現可能な変数として、既存研究の中でいくつかの提案がなされている. その中でも、ファジィランダム変数は基礎理論から応用面まで幅広く研究がなされており、数理計画問題をベースとした意思決定に関する研究においても有益な結果が得られている.

今回は、投入資源による作業時間の変化の不確実性・不確定性を表現するために作業時間の係数としてファジイランダム変数を用いる.

5.2 ファジイランダム変数

ファジイランダム変数とは、ファジィ性とランダム性の両方を表現することができる変数のことである. ファジイランダム変数 $d_i(\omega)$ は事象 ω が生起したとき実現値が式 (6) のメンバーシップ関数 $\mu_{d_i}(\omega)$ で定義される.

$$\mu_{d_i}(\omega) \begin{cases} L^{\frac{\bar{b}_i(\omega)-s}{\alpha_i}} \\ R^{\frac{s-\bar{b}_i(\omega)}{\beta_i}} \end{cases} \tag{6}$$

5.3 多目的ファジィランダム計画問題

しかし、ファジィランダム変数を含む式をそのまま取り扱うことはできないため、確率計画問題から多目的計画問題へ等価変換する必要がある. まずは、可能性測度を用いて定義する. 意思決定者が可能性測度に対する可能性レベル γ $(0 < \gamma < 1)$ を設定して、次の式 (7),(8) ように定義する.

$$\min \sum_{j \in V} a_i x_j \tag{7}$$

$$Pos(a_i x_j = \tilde{d}_i(\omega)) \geqq \gamma, i = 1..., m \tag{8}$$

更に、LR ファジィランダムの性質から式を等価変換し、式 (9) のような 2 種類の不等式制約として次の区間値を与える.

$$\bar{b}_i(\omega) - L^{-1}(\gamma)\alpha_i \leq a_i x_j \leq \bar{b}_i(\omega) + R^{-1}(\gamma)\beta_i \tag{9}$$

最終的に下記のような多目的ファジィランダム計画問題になる.

＜目的関数 1＞

$\min \sum_{j \in V} a_i x_j$

$y_s = 0, x_s = 0, x_t = 0$

$y_j + x_j - y_k \leq 0, jk \in E$

$y_t \leq T$

$y_j \geq 0, j \in V$

$\bar{b}_i(\omega) - L^{-1}(\gamma)\alpha_i \leq a_i x_j \leq \bar{b}_i(\omega) + R^{-1}(\gamma)\beta_i$

＜目的関数 2＞

$\min \sum_{l=1}^{12} \sum_{j=1}^{14} L_{lj} x_j$

$\sum_{j=1}^{7} L_{lj} x_j \leqq\ 4800, |l = 1, ..., 12$

6 パレート最適解

このような多目的計画問題の場合、2 つの目的関数の間に、一方が良くなれば他方が悪くなるトレードオフの関係がある. この場合、最適解が 1 つではない. よって、パレート最適解の概念の導入を検討する.

8 まとめ

実際の住宅建設の工程計画に対して、クリティカル・パスの計算を与えることができた. 更に、多目的ファジィランダム計画問題としての定式化することができた.

これからの課題としては、多目的計画問題を解く方法として、パレート最適解の概念の導入を検討する. または、線形計画問題を GA を用いて実際に解いて、そこから多目的な問題を解くときに、どうしたら良いかを考える.

参考文献

[1] 国内人口推移が、2030 年の「働く」にどのような影響を及ぼすか https://www.recruit-ms.co.jp/research/2030/report/trend1.html

[2] ネットワーク手法による施工計画のシステムアプローチに関する研究

[3] CPM を用いた不確実・不確定状況下におけるクリティカルパスの求解 https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/1948 08.pdf

[4] 第 2 章 ネットワーク構造－つながりを見る http://www.econ.tohoku.ac.jp/ ksuzuki/teaching/ch2.pdf

[5] 建設工事における総括工程計画モデルの開発研究

[6] 多目的ファジィランダム単純リコース問題に対する対話型意思決定とその応用 https://ci.nii.ac.jp/naid/130005466156/

[7] 可能性・必然性測度を用いた多目的ランダムファジィ線形計画問題に対する効率的厳密解法の構築

[8] GA のスケジューリング問題への応用 https://ci.nii.ac.jp/naid/10008806362/

[9] 非同期型島モデル並列 GA の評価 https://ci.nii.ac.jp/naid/10004577295/