

同世界放送システムのための遺伝的アプローチによる映像収集木構築手法の検討

牧田 航輝¹ 川上 朋也¹ 松本 哲² 義久 智樹² 寺西 裕一^{3,2}

概要：筆者らはこれまで、同世界放送と呼ぶ、複数の配信者による撮影対象全てがまるで同じ空間に存在するかのようなライブ放送システムを検討してきた。同世界放送では、リアルタイムに映像の収集と合成を行う必要がある。特定のサーバで全ての処理を行うとスケーラビリティに限界があるため、映像を合成しつつ収集する手法に焦点を当てる。収集木と呼ぶ、映像の収集順と合成位置を示す木構造を最適化する収集木決定問題を定義し、遺伝的アルゴリズムを用いた解法を提案する。シミュレーションの結果、合成する映像数によって最適な手法が異なるという結果が得られた。

1. はじめに

近年 YouTube Live などのインターネットライブ放送サービスが広く普及している。また、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響もあり、テレワークやオンライン授業などを行うため、リアルタイム映像配信サービスが広く利用されるようになった [1], [2]。映像配信において、複数の配信者が撮影した映像を1つの画面上に表示する場合、多くの映像配信サービスでは、画面を分割して決められた領域内に各映像を表示する方法がとられている。しかし、この方法では配信者同士でのコミュニケーションが取りづらかったり、視聴者にとっても遠隔地でやり取りをしているような感覚となったりする問題がある。筆者らはこれまで、そのように画面を分割することなく表示する「同世界放送」と呼ぶライブ放送システムを検討してきた [3]。同世界放送とは、多数の遠隔地で撮影された撮影対象が、まるで同じ空間に存在するかのようなライブ放送のことを言う。図1に同世界放送のイメージを示す。

同世界放送では、多数のリアルタイム映像をインターネット経由で収集し、低遅延に映像の合成を行い視聴者へ配信する必要がある。ほとんどの既存方式では、配信サーバが各映像を収集して合成しており、撮影者 (収集対象の映像) の増加に伴い、収集合成の負荷が配信サーバに集中



図1: 同世界放送のイメージ

し、処理の完了までの遅延が大きくなる問題が生じ得る。この問題によってノード上の処理や通信の遅延が大きくなると、同世界映像が視聴端末で再生されるまでの待ち時間や視聴中の再生途切れ時間も増大し、視聴者と配信者双方の満足度が低下する。映像の合成処理を分散させることで、この問題を軽減できる。そこで、合成対象となる映像を撮影するノード上でも合成処理を行い、合成後の映像を次に合成を担当するノードへと転送する。合成を担当する撮影者のノードを中継ノードと呼び、中継ノード上で映像の合成を行いつつ収集する方式を扱う。この方式では、映像の収集順と合成位置を表す木構造である「収集木」を構築する。

収集木では、各ノードがどのノードへと自身の撮影する映像を転送すべきかを決定している。本研究では、収集木の性能を評価する「更新率」と呼ぶ性能指標を導入し、高性能な収集木を決定するための「収集木決定問題」を定義し、遺伝的アルゴリズムを用いた解法を提案する。

¹ 福井大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, University of Fukui

² 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

³ 情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications
Technology

2. 関連研究

リアルタイム映像の合成に関する類似研究がある。例えば、超高臨場感通信技術 Kirari!では、あたかも目の前に別の空間にいる人が存在するような超高臨場感リアルタイム中継を目指している [4], [5]。そのために、高い解像度と広い視野角を持つサラウンド映像を生成することを目的とし、複数の 4K カメラで撮影した映像をリアルタイムに合成し、遠隔地へと伝送する技術を提案している [6], [7]。文献 [8] では、自由視点映像をリアルタイムに配信するための映像合成技術と、5G 網を用いた低遅延な配信システムを提案している。文献 [9], [10] では、交差点付近で複数車両が撮影した映像をリアルタイムに車車間通信で交換し合成することで鳥瞰映像を生成するシステムを提案している。また、複数カメラから得た映像を合成するのではなく、実写映像と CG を合成させる研究もある。文献 [11] では、ハンディカメラの動きを計測し、その動きを CG 空間内の仮想カメラに反映させることによって実写映像と CG をリアルタイムに合成させるためのハイブリッドセンサを開発している。これらの研究は、ある特定の地点を撮影した映像を用いて合成しているが、本研究のように複数地点で撮影された映像をインターネット経由で収集し合成することを想定していない。

また、遠隔での存在感や臨場感に着目した類似研究もされている。文献 [12] では、異なる場所の参加者や家具をヘッドマウントディスプレイ (HMD) に表示し、まるで参加者や物体が付近に存在するかのように臨場感を高めている。文献 [13] では、ユーザと対話相手と同じ映像内に合成した時に、「同じ空間にいる」という感覚 (ソーシャルテレプレゼンス) を強化させることを目的としている。文献 [14] では、カメラとプロジェクタを用いてリアルタイムに異なる部屋にいる人を実物大で映し出すことによって、存在感を高める技術を提案している。これらの研究はいずれも、遠隔での存在感や臨場感を高めることを目的としているが、多数の映像の収集や合成、撮影対象者以外の視聴者への映像配信は想定されていない。

Microsoft Teams の Together mode では、参加者の上半身が切り抜かれ、最大 49 人までの参加人数に応じて各撮影対象を最適なサイズに変更し、共通の背景に自動的に配置される [15]。同じ空間内に参加者を表示することによって、より自然なコミュニケーションをとることが可能になるとされている。しかし、参加者の映像を集中型で収集及び合成するモデルでは、処理サーバに高い処理性能が要求されスケーラビリティにも限界がある。

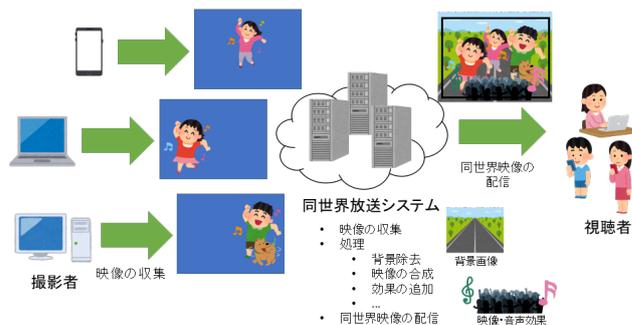


図 2: 同世界放送の概要

3. 同世界放送システム

3.1 システムの概要

同世界放送システムは、異世界放送システム [16] と同様に、複数の処理コンピュータがリアルタイム映像の収集や合成、視聴者へのライブ放送を行う分散型のモデルを想定している。図 2 に同世界放送の概要を示す。同世界放送では、まず合成元となるリアルタイム映像を複数の撮影者からインターネット経由で収集する。その後、それらの映像を合成することにより 1 つの映像を生成する。処理内容として、元映像の背景除去やあらかじめ用意した背景画像への合成、その他映像や音声効果の追加などが考えられる。また、各映像の表示位置や重ね合わせの順序 (他の映像との前後関係) については、その映像を撮影するユーザが決定できることを想定している。合成映像が生成されたら、それを視聴者へと配信する。

3.2 映像合成手法

映像を合成する場合、撮影者からどのようにして映像を収集し合成するのが問題となるのだが、大きく分けて 2 通りの手法が考えられる。図 3 に映像の合成モデルを示す。図 3a は集中型のモデルを表している。このモデルは、全撮影者が合成処理を行う特定のサーバに映像を送り、そのサーバで全ての合成処理を行うというものである。単純で分かりやすいモデルではあるが、スケーラビリティに問題がある。合成すべき映像数が少ないうちは問題とはならないが、映像数が増加した場合には通信負荷と処理負荷の限界を迎え、合成が完了するまでの遅延が大きくなることが予想される。もう 1 つのモデルとして、図 3b は分散型のモデルを表している。このモデルでは、撮影するノード自身も合成処理を行う可能性がある。以後、そのように合成処理も行うノードを中継ノードと呼ぶ。分散型のモデルでは、合成処理を担当する特定のサーバを持たずに、処理負荷を分散させている。同世界放送システムにおいて、より多くの映像をリアルタイムに合成するためには分散型のモデルを扱うことが望ましい。筆者らの以前の研究においても、合成する映像数が多くなればなるほど、2 分木や 4

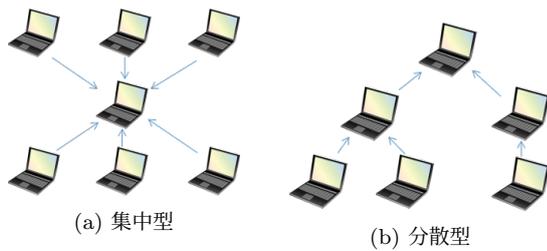


図 3: 集中型と分散型の合成モデル

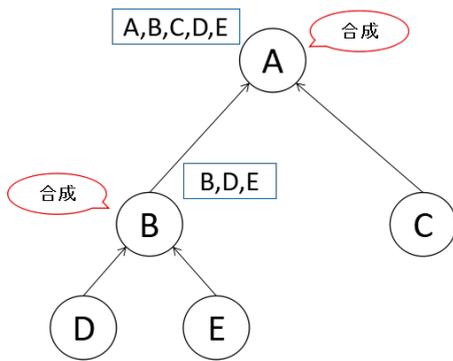


図 4: 映像合成の例

分木を構成し処理を分散させることで、より短時間で合成処理が完了できることが確認されている [3].

図 4 は分散型のモデルによる映像合成の例を示している。A-E は撮影ノードを表しており各ノードは自身で映像を撮影している。図の左側では、D が撮影する映像と E が撮影する映像が B に転送され、B で B, D, E の映像を合成している。そして、その合成映像を次の A に転送する。右側では C が撮影する映像を A に転送することにより、最終的に A で全ての映像が合成される。このように、映像の転送元が子、転送先が親を表す木を収集木と呼ぶ。

4. 収集木決定問題

3 章では、同世界放送システムにおいて、収集木を構築することで処理を分散させることを述べた。しかし、収集木では各ノードがどのノードへと映像を転送するのか、どのノードが合成処理を行うのが重要となるため、収集木の構築手法が必要となる。同世界放送に参加するノードは様々であることが考えられるため、適切な収集木を構築するには各ノードでの処理性能や通信帯域を考慮する必要がある。本章では、どのような収集木を良い収集木とするかを定めるための指標を導入し、解決すべき問題について述べる。

4.1 問題定義

本手法において、収集木には 1 つの配信サーバが存在することを想定する。また、各ノードで撮影された映像は、中継ノードを経るか否かに関わらず、最終的に必ず配信サーバに集約される。つまり、配信サーバは収集木の根に配置

される。配信サーバはそれまでに子ノードで合成された映像を含め、全ての映像を合成した後にある一定のフレームレートで配信する。すなわち、配信サーバでの合成処理実行前に受信した映像のみが合成され、それより遅れて受信した映像については、そのフレームでは合成されない。そのため、リアルタイム映像を合成するには、配信サーバでの合成処理前のタイミングでより多くの映像を収集することが重要となる。

収集木の性能を評価するため、更新率と呼ぶ性能指標を導入する。更新率 U は式 (1) で定義される。

$$U = \frac{|R|}{|N|} \quad (1)$$

R は配信サーバでの合成処理前のタイミングで収集されるフレーム集合、 N は配信サーバを除いた収集木を構成するノード集合を表す。更新率が 1 のとき全ての映像がフレーム毎に更新され、更新率が 0 のとき全ての映像が更新されず動きが無い映像に見える。

以上より、様々な処理性能やネットワーク帯域が混在する状況下で最適な収集木を見つけ出すことにより、更新率を最大化することが目的となる。これを同世界放送における収集木決定問題と呼び、以下ではこの問題に対する解法を述べる。

4.2 更新率の計算

本節では、提案手法で用いる、ある収集木の更新率の計算方法を説明する。

ノード n における処理時間 $P(n)$ は、式 (2) で表される。

$$P(n) = |C_n|V_n + F_n \quad (2)$$

C_n はノード n の子集合、 V_n は子が増える毎に増加する合成処理時間、 F_n は子の数に関係なくかかる処理時間を表す。また、ノード n がノード m から 1 フレームの映像を受信するのにかかる通信時間 $T_{n,m}(C_n)$ は、式 (3) で表される。

$$T_{n,m}(C_n) = \frac{S_m}{B_{n,m}(C_n)} \quad (3)$$

S_m はノード m から送信される映像の平均フレームデータサイズ、 $B_{n,m}$ はノード n, m 間の通信帯域を表す。 $B_{n,m}$ は次式 (4) で表される。

$$B_{n,m}(C_n) = \begin{cases} \frac{I_n O_m}{O_{C_n}} & (\frac{I_n O_m}{O_{C_n}} < O_m) \\ O_m & (\frac{I_n O_m}{O_{C_n}} \geq O_m) \end{cases} \quad (4)$$

I_i はノード i における入帯域、 O_i はノード i における出帯域を表す。よって、 O_{C_n} はノード n の全ての子の出帯域の合計であり、式 (5) で表される。

$$O_{C_n} = \sum_{k \in C_n} O_k \quad (5)$$

上記の式を用いることにより、 R は次式(6)で表される。

$$R = \left\{ n \mid n \in N, \sum_{k \in W_n} (P(k) + T_{\text{parent}(k),k}(C_{\text{parent}(k)})) < \frac{1}{f} \right\} \quad (6)$$

W_n はノード n から配信サーバまでの経路に含まれるノード集合、 f は配信サーバのフレームレートを表す。最終的に、更新率は式(1)を用いて計算される。配信サーバは更新率の計算に必要な情報を全ノードから収集する。

収集木上で、各ノードの送信先候補数は、自身を除いた $(|N| - 1)$ ノードと配信サーバ1つを合わせた $|N|$ 個ある。よって、収集木の候補数は $|N|^{|N|}$ 通り存在する。上記の更新率の計算は1つの収集木に対して1回行われる。更新率が1となれば最大値であるため、それが最適な収集木となりその時点で収集木の探索を終了できる。しかし、更新率が1未満の場合は、より良い収集木が存在する可能性があるため、収集木の探索を継続する必要がある。つまり、最悪の場合 $|N|^{|N|}$ 回更新率の計算を行わねばならない。全探索を行うと送信先候補の数が多いほど組み合わせの数が多くなり、リアルタイムに収集木を構築することが困難である。

そこで、この問題を解決するためにはメタヒューリスティック[17]な解法を利用したり、ヒューリスティック[18]な解法を考案したりする必要がある。ヒューリスティックとは、経験に基づく発見的な手法であり、一般に最適解は保証されないが近似解が得られる手法である。ヒューリスティックはある問題に特化した手法を指す一方、様々な問題に応用可能な汎用的な近似アルゴリズムであるメタヒューリスティックな手法も存在する。本稿では、メタヒューリスティックの1つである遺伝的アルゴリズム[19]を用いることにより、収集木決定問題を解く手法を提案する。

5. 遺伝的アルゴリズムによる収集木構築

本章では、遺伝的アルゴリズムを収集木決定問題に適用させる方法について述べる。

5.1 染色体の構造

遺伝的アルゴリズムは、生物の進化を模したアルゴリズムであり、遺伝情報を伝えるための染色体を用意する必要がある。図5に本手法で用いる染色体の構造例を示す。同世界放送に参加するノード数が N の時、各ノードは $i = 1, 2, \dots, N$ の番号を割り当てられる。染色体は配列で表現され、各要素を遺伝子と呼ぶ。遺伝子はノード番号を表しており、ノード番号 i は染色体の遺伝子座と対応する。遺伝子座とは、染色体の位置を言う。各遺伝子は、遺伝子座が示すノードからの映像の送信先を表す。この例では、同世界放送に参加するノード数が6である状況を想定

i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
2	5	s	3	s	2

図5: 染色体の構造例

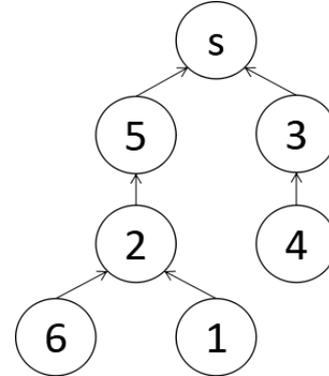


図6: 図5の染色体が表す収集木

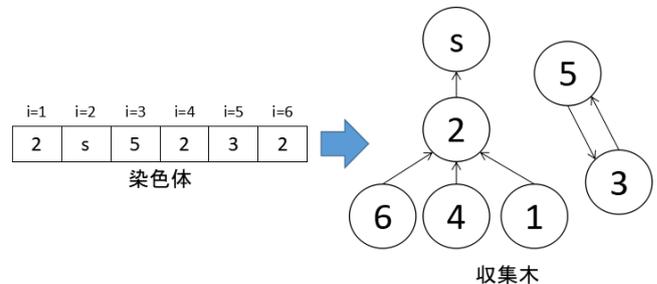


図7: 制約1が守られない例

している。図中の数字はノード番号、sは配信サーバを示している。例えば、遺伝子座1の遺伝子は2であるので、ノード1はノード2に映像を転送することを示す。よって、図5の染色体は、図6に示す収集木を表している。

5.2 収集木の制約

上記の染色体の構造から、各遺伝子を決定すれば収集木が構築される。しかし、遺伝子の組み合わせによっては、正しい収集木が成立しない場合がある。正しい収集木を構築するには、次の2つの制約を守る必要がある。

- (1) 配信サーバを根ノードとする1つの木が構築される
- (2) ユーザが指定する合成の前後関係が保たれる

制約1は、収集木決定問題の定義を守るために必須である。遺伝子の組み合わせによっては、1つの収集木が構築されない場合があり、その場合は参加者の映像を合成することができず、同世界放送が成立しない。図7は、制約1が守られない例である。ノード3と5で互いに映像を送り合うことを示す染色体を作っているため、収集木が成立していない。

また、同世界放送では、各映像の表示位置はその映像を撮影するユーザが指定することを想定しており、複数の映

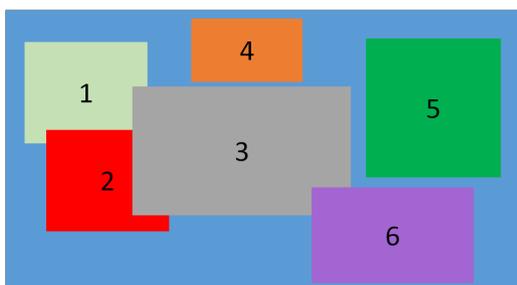


図 8: 合成後の映像例

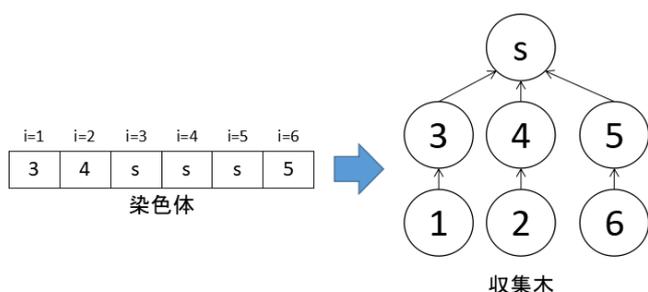


図 9: 制約 2 が守られない例

像が重なる位置に表示される可能性がある。そのような場合には、どの映像が前面または背面に表示されるのかが重要となる。前面・背面の関係についてもユーザが指定できることを想定しているため、その前後関係を保持する必要があるため、制約 2 が必要となる。図 8 は、合成後の映像例である。図中の青い部分は背景、数字が書かれた長方形は、そのノード番号が撮影した映像を表している。図の例では、映像 2 の下に映像 1、上に映像 3 が重なっている。このような合成順を保持できる収集木の構築が求められる。図 9 は、制約 2 が守られない例である。配信サーバを根とする木が構築できており、制約 1 は守ることができている。図 9 の収集木では、合成された映像 $\{1, 3\}$, $\{2, 4\}$, $\{5, 6\}$ が配信サーバで合成されることを示している。しかし、これでは映像 2 は映像 1 と 3 両方の背面もしくは前面に位置することしかできず、映像 1 と 3 に挟まれるような合成が不可能となる。

5.3 収集木の決定

遺伝的アルゴリズムでは、まず初期の個体群を生成し、適合度の高い個体ほど生き残り子孫を残すのだが、その個体 1 つ 1 つを解とみなす。収集木決定問題において、適合度は更新率のことであり、更新率が高い収集木が残りやすいことを意味する。5.2 節で述べた制約を満たさない場合は、適合度 0 となる。進化の過程では、選択や交叉、突然変異が発生する。選択では、適合度の高い個体ほど生き残り子孫を残しやすいように選択される。交叉では、2 つの個体を親としてそれぞれの遺伝子を組み替えることによって 1 つの子が生成される。突然変異では、1 つの個体に対して、ある遺伝子が別の値に書き換えられる。これらの操

作が行われることは、収集木における各ノードの親が変化することに対応する。これらの操作を、更新率が 1 となる収集木が発見できるか、更新率が 1 とならずにあらかじめ決められた一定数繰り返すことにより、その時点までに発見された最も良い収集木を決定する。

6. 評価

6.1 シミュレーション設定

遺伝的アルゴリズムによって構築される収集木をシミュレーション評価した。更新率の結果に影響する各ノードの処理性能や通信帯域などのパラメータを表 1 に示す。各映像の幅と高さは一定であり、それ以外のパラメータについては、表に示される範囲でランダムに決定される。式 (3) に含まれるフレームデータサイズは様々な要因によるが、予備実験で得られた結果を考慮し 19.6 [KB] とした。 V_n , F_n は式 (2) の処理時間である。配信サーバについては、他のノードよりも高性能であることを想定し、入帯域 100 [Mbit/s], $V_n=3$ [ms], $F_n=1$ [ms] とした。また、インターネットライブ放送で現実的なフレームレートを考慮してフレームレートは 10 に設定した。次に、遺伝的アルゴリズムに必要な設定について述べる。個体群のサイズは 10 とし、選択はトーナメント方式、交叉率 80%, 突然変異率 1% とした。最大世代数は 200 としており、200 世代後に更新率 1 の収集木が得られていなければ、それまでに見つけた中で最も更新率の高い収集木を出力する。

本シミュレーションでは、同世界放送に参加するノード数を 1 から 50 まで順に増加させ、各ノード数で得られた更新率と収集木決定にかかる計算時間を計った。図 10 はシミュレーションに用いた映像の配置を示している。図中の青色の部分背景、ピンク色の四角形が映像を表しており、映像は番号順に増加させた。比較手法として、集中型とデイジーチェーンを用いた。集中型は、全てのノードが自身の映像を中継ノードを経ずに配信サーバに送信する。デイジーチェーンは、全ノードが最背面から最前面に向かって映像を送信する順に一続きにつながっている。また、遺伝的アルゴリズムの初期個体群として、ランダムに与える場合と、集中型とデイジーチェーンを与える場合による比較も行う。なお、更新率と計算時間は 10 回の測定結果の平

表 1: シミュレーションに用いた各ノードのパラメータ

項目	値
幅	80 [pixel]
高さ	80 [pixel]
深度値	1-1000
入帯域	1-20 [Mbit/s]
出帯域	1-20 [Mbit/s]
V_n	8-15 [ms]
F_n	3-10 [ms]

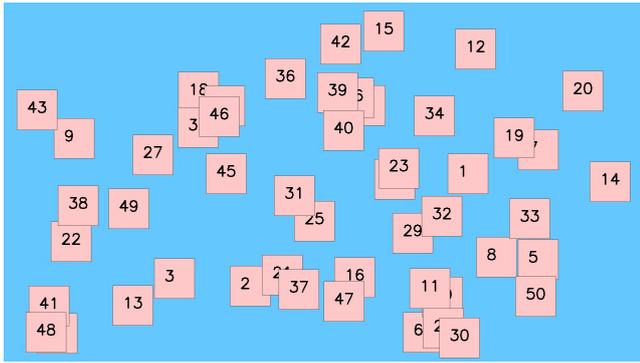


図 10: シミュレーション対象の映像の配置

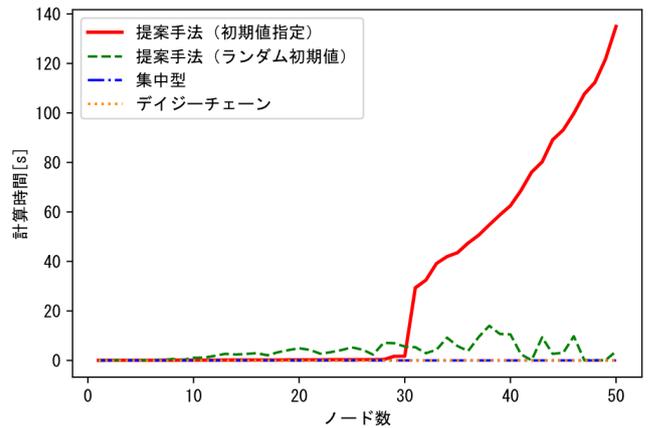
均をとっている。

6.2 シミュレーション結果

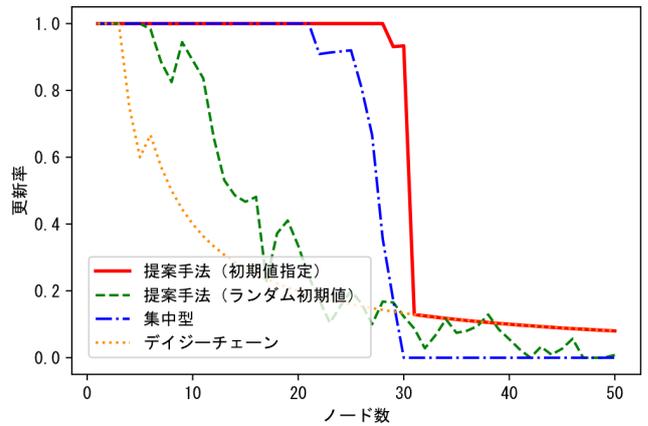
図 11 はシミュレーションの結果を示している。図 11a が計算時間、図 11b が更新率を示す。横軸はいずれもノード数、縦軸はそれぞれ計算時間と更新率である。集中型とデージーチェーンについては、ほぼ 0 秒で収集木を構築できている。一方で、ノード数が少ない場合の更新率は高いものの、ノード数が増加するにつれて更新率は低下している。特に、集中型はノード数 30 で急激に低下していることが分かる。これは、ノード数 30 の時に配信サーバが処理できる限界を超えたことが原因であると考えられる。

次に、ランダムな初期値を与えた場合の結果を見る。計算時間はノード数によって大きく変動している。ノード数が少ない場合は染色体が短く、また収集木の組み合わせも少ないため短い計算時間で済んでいると言える。ノード数 40 程度で計算時間が長くなるが、その後また減少する傾向にある。これは、ノード数が増えるに従って正しい収集木が得られにくくなったことに起因すると考えられる。ノード数が増えればそれだけ 5.2 節で述べた制約を守ることが困難となる。制約が守られない場合、4.2 節で述べた更新率の計算を行う必要が無いため、計算時間は短くなる。更新率については、変動しながらも、ノード数が増加するにつれて低下する傾向にある。

最後に、集中型とデージーチェーンを初期値として与えた場合の結果を見る。計算時間はノード数 30 まではほぼ 0 秒で済んでいるものの、それ以降は急激に増加している。これは、前述の集中型の結果に由来する。初期値の中に既に更新率が 1 となる最適な収集木が存在したために、その時点で遺伝的アルゴリズムを終了することができるためである。しかし、その後は集中型やデージーチェーンの更新率が良くないため、より良い解を得るための計算時間がかかっていると言える。しかしながら、ランダムな初期値を与えた場合のように、収集木の制約が守られない状況が発生することはないため、計算時間が短く終わることもなく、ノード数の増加に伴い計算時間も増加する。一方で、更新



(a) 計算時間



(b) 更新率

図 11: シミュレーション結果

率についてはノード数 30 までは集中型、それ以降はデージーチェーンの結果と似ている。

以上の結果をから、ノード数が少ない場合は集中型が高い更新率を短時間で得られたり、ノード数が多い場合には、デージーチェーンが更新率の低下を抑えられたりと、ノード数によってどの手法が良いかは変化すると言える。更新率については、集中型やデージーチェーンを初期値とする提案手法が最も優れているが、計算時間は 50 ノードで 120 秒を超えている。同世界放送はリアルタイム配信を行うので、収集木の決定に時間がかかれば、それだけユーザは待たされることになるため、あまり現実的な解法とは言えない。その点において、ランダムに初期値を与える手法では、5 秒から 10 秒程度で、更新率は集中型とデージーチェーンの平均をとったような値が得られているので、バランスの良い手法である。

7. まとめ

本稿では、同世界放送においてリアルタイムに映像合成を行うために、更新率と呼ぶ性能指標及び収集木決定問題を定義した。また、更新率の良い収集木を得るために、遺伝的アルゴリズムを用いた収集木構築手法について検討

した。シミュレーションによる評価を行った結果、ノード数が少ない場合には集中型、ノード数が多い場合にはダイジェーションが良く、提案手法はノード数に関わらず現実的な時間でそれなりの更新率が得られることが分かった。しかし、集中型やダイジェーションを大きく上回るほどの性能は見られなかった。原因として、遺伝的アルゴリズムで用いる染色体の構造と同世界放送で考える収集木の構造が異なっているために、上手く機能していないことが考えられる。今後は、ノード数に関わらず良い収集木を構築できるように手法の改善を考える。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 22K12009, 21H03429, 18K11316, 放送文化基金, 「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業, G-7 奨学財団研究開発助成事業による成果である。

参考文献

- [1] 小豆川裕子: BCP とテレワーク: 業務を継続するための環境整備, 情報の科学と技術, Vol. 70, No. 9, pp. 447–451 (2020).
- [2] 河合豊明: オンライン授業の取り組み, 新地理, Vol. 68, No. 2, pp. 13–16 (2020).
- [3] Makida, K., Kawakami, T., Matsumoto, S., Yoshihisa, T., Teranishi, Y. and Shimojo, S.: Same World Broadcasting: An Internet Broadcasting System for Real-Time Distributed Video Compositions, *Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Architecture, Design, Deployment and Management of Networks and Applications (ADMNET 2021)*, pp. 1423–1428 (2021).
- [4] 高田英明: イマーシブテレプレゼンス技術 “Kirari!”, 日本画像学会誌, Vol. 56, No. 4, pp. 366–373 (2017).
- [5] 阿久津明人, 南 憲一, 日高浩太: 超高臨場感通信技術 Kirari! Beyond 2020, NTT 技術ジャーナル, Vol. 30, No. 10, pp. 12–15 (2018).
- [6] 山口徹也, 佐藤孝子, 小野正人, 外村喜秀, 難波功次, 菊地由実, 星出高秀, 森住俊美, 小野 朗, 南 憲一: 高臨場感ライブビューイングサービスのためのサウンド映像合成・同期伝送システム, 映像情報メディア学会誌, Vol. 74, No. 2, pp. 402–411 (2020).
- [7] 佐藤孝子, 難波功次, 小野正人, 菊池由実, 山口徹也, 小野 朗: 競技空間全体の高臨場ライブ中継に向けたサウンド映像合成・同期伝送技術, NTT 技術ジャーナル, Vol. 29, No. 10, pp. 19–23 (2017).
- [8] 野中敬介, 渡邊良亮, 塚本航平: 5G 網を利用した自由視点映像リアルタイム配信技術, 映像情報メディア学会誌, Vol. 74, No. 1, pp. 180–186 (2020).
- [9] 小谷和也, 孫 為華, 木谷友哉, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤 実: 交差点鳥瞰映像の協調撮影と共有を目的とした車車間通信プロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 6, pp. 1980–1992 (2011).
- [10] 小谷和也, 中村正人, 木谷友哉, 孫 為華, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤 実: 複数のカメラ映像の合成によるリアルタイム鳥瞰映像提示システム, 第 17 回情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2009) 論文集, pp. 109–110 (2009).
- [11] 加藤大一郎, 武藤一利, 三ッ峰秀樹: ハイブリッドセンサを用いたハンディカメラによるバーチャルスタジオの開発と実用化, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 1, pp. J13–J22 (2018).
- [12] Keshavarzi, M., Yang, A. Y., Ko, W. and Caldas, L.: Optimization and Manipulation of Contextual Mutual Spaces for Multi-User Virtual and Augmented Reality Interaction, *Proceedings of the 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR 2020)* (2020).
- [13] 田中一晶, 加藤良治, 中西英之: 鏡型ビデオ会議における視触覚相互作用によるソーシャルテレプレゼンスの強化, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 5, pp. 946–954 (2017).
- [14] Pejsa, T., Kantor, J., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.: Room2Room: Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment, *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing (CSCW 2016)*, pp. 1716–1725 (2016).
- [15] Lanier, J.: How to get the most from Together mode, <https://techcommunity.microsoft.com/t5/microsoft-teams-blog/how-to-get-the-most-from-together-mode/ba-p/1509496>. (参照 2022-05-08).
- [16] Matsumoto, S., Yoshihisa, T., Kawakami, T., Ishi, Y. and Teranishi, Y.: Different Worlds Broadcasting: A Distributed Internet Live Broadcasting System with Video and Audio Effects, *Proceedings of the 31st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2017)*, pp. 71–78 (2017).
- [17] 相吉英太郎: メタヒューリスティックスとは何か, 電気学会誌, Vol. 126, No. 9, pp. 614–617 (2006).
- [18] 相吉英太郎, 岡本 卓, 小林容子: ヒューリスティックな最適化手法とモデリング: 第 1 回 最適化問題とは, 日本原子力学会誌 ATOMO Σ, Vol. 53, No. 11, pp. 777–781 (2011).
- [19] 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 人工知能, Vol. 7, No. 1, pp. 26–37 (1992).