

遠隔作業支援システムのための アノテーション自動生成機能の方式検討

大多和均^{†1} 佐野良樹^{†2} 長沼晶子^{†2}
古澤昌也^{†2} 湯瀬裕昭^{†1} 渡邊貴之^{†1}

本研究では、遠隔作業支援システムでの作業⇒指導者型の AR 活用について検討を行う。具体的には、作業者が撮影した映像から物体検出によって作業対象物を特定し、あらかじめマーカとラベル番号によるアノテーションを書き込んだ上で、指導者に提示する。これにより、指導者は映像に自らアノテーションを書き込むことも可能だが、あらかじめ書き込まれたアノテーションを活用して音声のみで作業者に指示することも可能となる。一方、物体検出処理は計算負荷が高く、作業側側の機器としてパーソナルコンピュータと比較して性能の低いスマートフォンを用いた場合、システムの動作速度が大幅に低下する可能性がある。筆者らの遠隔作業支援システムでは、作業者のスマートフォンで撮影した映像は中継サーバを介して指導者側に送信される。そこで、物体検出処理をスマートフォン内で行う場合と、中継サーバで行う場合の性能比較を実施する。中継サーバで処理を行うことにより、物体検出処理の速度向上が期待できる。一方、スマートフォンと中継サーバ間のネットワーク遅延等により、作業側側のスマートフォンにおいて表示している映像と、中継サーバから返送されたアノテーションにはタイムラグが生じる。結果的に、作業側側のスマートフォンにおいて作業対象物とアノテーションの表示位置にずれが生じる可能性がある。表示位置のずれは、指示された作業対象物の誤認につながるため、どの程度のタイムラグが生じるかを定量的にモデル化し、評価実験を行う。

An Examination of the Method for Automatic Creating Function of Annotation for the Remote Instruction Support System

Hitoshi OOTAWA^{†1} Yoshiki SANO^{†2} Akiko NAGANUMA^{†2}
Masaya FURUSAWA^{†2} Hiroaki YUZE^{†1} Takayuki WATANABE^{†1}

1. はじめに

遠隔地にいる指導者が作業の現場に出向くことなく、作業者に指示を行う遠隔作業支援システムにより、作業の効率化やコストの削減が期待されている。遠隔作業支援では、指導者は何らかの手段を用いて作業者の状態を把握し、その状況に合わせて的確な指示を作業者に伝える必要がある。特に近年、インターネットの普及と広帯域化に伴い、Skype やテレビ会議システムなどを用いた、遠隔地間での映像・音声を使った双方向のコミュニケーションの手段が普及してきている。これらを用いることにより、インターネット経由で、作業者の状態を映像で確認し、遠隔地から音声で指示を行うことが可能である。しかし、現場での指示では指さしなどで作業対象を指定するなど非言語的な動作による指示も行われているのに対して、音声のみの指示ではそれらの指示が難しいといった限界がある。そのため、音声以外の方法も活用した遠隔作業支援システムの研究が行われている[1]-[10]。

近年、著しく普及が進んでいるスマートフォンには、カ

メラ、タッチパネル付きディスプレイ、各種センサなどがコンパクトに集積されているため、遠隔作業支援システムのプラットフォームとして適していると考えられる。また、スマートフォンやタブレット端末は、日常的に手にする機会が多いため、習熟が容易であり直感的にシステムを使用することが可能であると考えられる。

上述の理由から、これまでに筆者らは作業者が操作する機器としてスマートフォンを用いる遠隔作業支援システム SPRInT を開発している[5][6]。また、SPRInT は指導者と作業者が 1 対 1 のシステムであるのに対して、1 対多の指導者に対応した SPRInTx についても開発を行っている[7][8]。これらのシステムでは、指導者が作業者に対して音声だけでなく、拡張現実 (AR) の手法を取り入れ、作業者が撮影している動画像にマーカや線画等のアノテーションを重ね合わせて作業指示を行う。すなわち、指導者の指示内容を作業者に正確に伝達するために AR を活用している、指導者⇒作業側型の AR 活用といえる。

一方で、AR を活用することによって、作業者の状態や作業現場の状況を指導者に詳細に伝達することも可能であろう。これは、作業側⇒指導者型の AR 活用といえる。筆者らは、遠隔作業支援システムに類似の遠隔学習支援システムにおいて、看護師のフィジカル・アセスメント教育における学習者の手技の圧力分布を映像に重ね合わせて表示

^{†1} 静岡県立大学大学院経営情報イノベーション研究科
Graduate School of Management and Information of Innovation, University of Shizuoka.

^{†2} 静岡県立大学経営情報学部
School of Management and Information, University of Shizuoka.

し、遠隔地の指導者に提示するシステムを開発している[11][12]。これは、学習者⇒指導者型のAR活用といえる。

また、筆者らは、遠隔作業支援システムにおける作業者⇒指導者型のAR活用を実現する基礎実験として、作業者が撮影した映像にあらかじめ格子状のグリッド線を合成し、指導者に提示する手法の評価を行った[9]。グリッド線をあらかじめ映像に合成しておくことで、指導者自らがアノテーションを設定することなしに、作業対象物の位置を音声のみで指示できることが期待された。しかし、グリッド線は作業対象物の大まかな位置を特定できるものの、正確な位置を指示するためには追加の音声による指示が必要であり、作業時間の短縮には結びつかなかった。

本研究では、文献[9]とは異なった方式での作業者⇒指導者型のAR活用について検討を行う。具体的には、作業者が撮影した映像から物体検出によって作業対象物を特定し、あらかじめマーカとラベル番号によるアノテーションを書き込んだ上で、指導者に提示する。これにより、指導者は映像に自らアノテーションを書き込むことも可能だが、あらかじめ書き込まれたアノテーションを活用して音声のみで作業者に指示することも可能となる。

一方、物体検出処理は計算負荷が高く、作業者側の機器としてパーソナルコンピュータと比較して性能の低いスマートフォンを用いた場合、システムの動作速度が大幅に低下する可能性がある。筆者らの遠隔作業支援システムでは、作業者のスマートフォンで撮影した映像は中継サーバを介して指導者側に送信される。そこで、物体検出処理をスマートフォン内で行う場合と、中継サーバで行う場合の性能比較を実施する。中継サーバで処理を行うことにより、物体検出処理の速度向上が期待できる。一方、スマートフォンと中継サーバ間のネットワーク遅延等により、作業者側のスマートフォンにおいて表示している映像と、中継サーバから返送されたアノテーションにはタイムラグが生じる。結果的に、作業者側のスマートフォンにおいて作業対象物とアノテーションの表示位置にずれが生じる可能性がある。表示位置のずれは、指示された作業対象物の誤認につながるため、どの程度のタイムラグが生じるかを定量的にモデル化し、評価実験を行う。

2. 関連研究

指導者が遠隔地にしながら視覚情報や音声情報を用いて作業の指示を行う遠隔作業支援に関する研究は、これまでに様々な報告がされている。

スマートフォンやタブレット端末をプラットフォームとして開発された遠隔作業支援システムとしては、文献[1][2]がある。また、作業者用の端末としてメガネ型ヘッドマウントディスプレイと目線カメラを組み合わせたウェアラブル端末を用いたシステムとして文献[3]がある。これらのシ

ステムでは、SPRInTxと同様、作業者が撮影した動画が指導者の端末に送信される。また、指導者から作業者へのアノテーションの伝送も可能である。

文献[4]では、スタンプと呼ばれるアノテーションを指導者が映像内に貼り付けると、作業者の映像内にも同位置にスタンプが表示される。また、作業者の手振れ等によりスタンプの位置が作業対象物からずれることを防止するため、画像処理によって作業対象物を追尾する機能が備わっている。しかし、スタンプを表示するためには、指導者自身が画面をタップ等する必要がある。

また、遠隔作業支援システムとは異なるが、ARを活用した機器の保守修繕のためのシステムとして文献[14]-[18]がある。これらの研究では、作業者は頭部にヘッドマウントディスプレイとカメラおよび傾きセンサ等を装着し、ヘッドマウントディスプレイには修理手順のテキストや作業対象物へのマーカ等が合成されることで、現実の空間にないものが可視化され、指導者なしに作業の効率化を図っている。一方、これらの研究におけるARの処理は高性能なワークステーションで行い、複数のセンサを組み合わせた大がかりな装置となっている。そのため、作業者側の機器としてスマートフォンを用いる本研究では、計算機資源の制約はより厳しいものとなる。

3. SPRInTx

これまでに筆者らは作業者が操作する機器としてスマートフォンを用いる遠隔作業支援システムSPRInTを開発した。また、SPRInTは指導者と作業者が1対1のシステムであるのに対して、1対多の指導に対応したSPRInTxについても開発を行った。本章では、まずSPRInTxのシステム構成について述べ、次に、指導者⇒作業者型のARを活用した機能について説明する。さらに、作業者⇒指導者型のARを活用した機能の基礎検討について紹介する。

3.1 SPRInTx システムの概要

文献[5]-[8]において、従来筆者らが開発してきたSPRInTxの概要を図1に示す。このシステムでは、作業者がスマートフォンで撮影した動画を、中継サーバを介して指導者側のパソコンやタブレット端末に送信する。指導者が映像の指示対象物をダブルクリック（タブレット端末の場合はタップ）することで、映像にマーカによるアノテーションを設定することができる。したがって、指導者は音声だけでなく、アノテーションを用いた非言語的な指示が可能となる。

初期のSPRInTxでは、指導者の指示内容を作業者に正確に伝達するためにARを活用しており、指導者⇒作業者型のAR活用といえる。

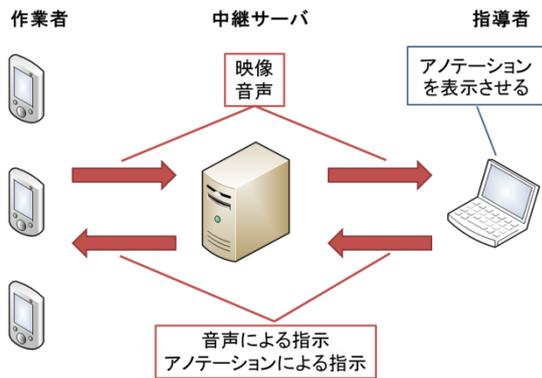


図1 従来のSPRInTxの概要

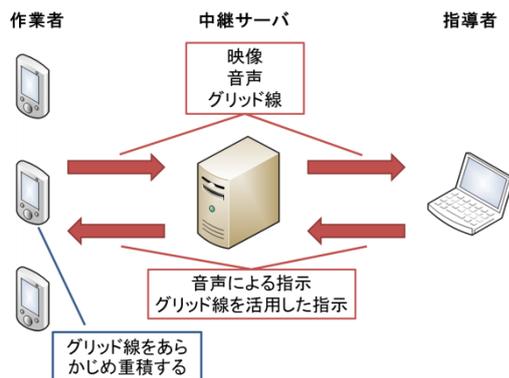


図2 グリッド線表示の概要

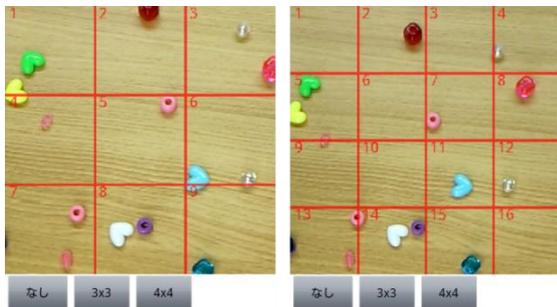


図3 グリッド線表示の例

3.2 グリッド線表示機能

初期のSPRInTxでは、指導者⇒作業者型のAR活用のみが実装されていた。一方で、ARを活用することによって、作業者の状態や作業現場の状況を指導者に詳細に伝達する作業者⇒指導者型のAR活用も可能であろう。

筆者らは、文献[9]において、遠隔作業支援システムにおける作業者⇒指導者型のAR活用を実現する基礎実験として、作業者が撮影した映像にあらかじめ格子状のグリッド線を合成し、各セルの左上にナンバリングを行い、指導者に提示する手法の評価を行った。グリッド線表示機能の概要と実際の表示例を、図2および図3に示す。これにより、指導者自らアノテーションを設定することなしに、作業対象物の大まかな位置を音声のみで指示できると考えた。この手法について評価を行ったところ、作業時間の短縮には

結びつかず、グリッド線とナンバリングのみのアノテーションでは、作業対象物の正確な位置を指示する際に追加の音声指示が必要になることが分かった。

4. アノテーション自動生成機能

本章では、グリッド線表示機能とは異なった方式での作業者⇒指導者型のAR活用について検討を行う。具体的には、作業者が撮影した映像から物体検出によって作業対象物を特定し、あらかじめマークとラベル番号によるアノテーションを書き込んだ上で、指導者に提示する。これにより、指導者は映像に自らアノテーションを書き込むことも可能だが、あらかじめ書き込まれたアノテーションを活用して音声のみで作業者に指示することも可能となる。

4.1 システムの概要

物体検出機能により作業対象物を特定し、アノテーションを正確な位置に自動生成する手法を提案する。アノテーション自動生成機能の概要を図4に、動作シーケンスを図5に示す。この手法では、作業者側のスマートフォン内で物体検出を実行し、作業対象物の検出位置にアノテーションを描画する。また、物体検出は作業者側のスマートフォンで実行し、映像の伝送方式はMotion JPEGを採用しているため、作業者・中継サーバ間および中継サーバ・指導者間の通信方式としてHTTP通信を採用した。

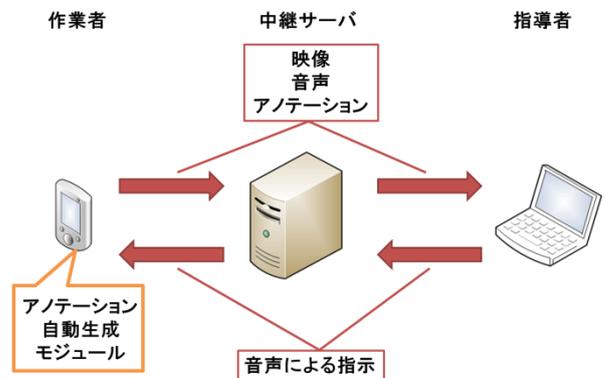


図4 アノテーション自動生成機能の概要

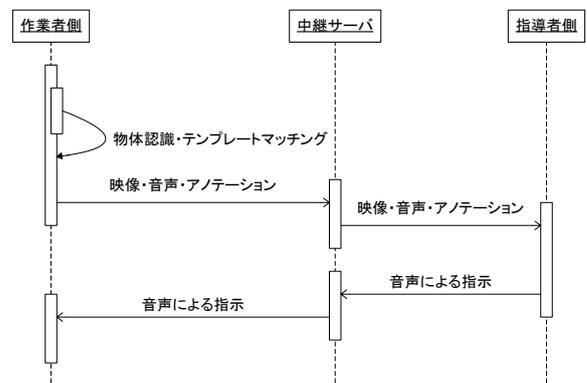


図5 アノテーション自動生成機能の動作シーケンス

4.2 物体検出アルゴリズム

作業対象物の位置を特定するために実装した物体検出アルゴリズムについて説明する。本研究では、図6に示すようなRCA端子へのケーブル接続作業を想定し、RCA端子を検出するオブジェクト検出器をAdaBoost[19]による統計学習によって生成した。統計学習ではRCA端子の正解画像として8000枚、非正解画像として1319枚を用いてHOG特徴量をもとに学習を行った。

オブジェクト検出器を用いた物体検出では、各フレームで検出される物体は独立しているため、あるフレームで検出された物体が次のフレームでどこに移動したかまでを認識することはできない。また、検出対象ではない物体を数フレームのみ誤認識によって検出してしまう場合もある。そこで、オブジェクト検出器によって検出した領域の座標・幅・高さ情報を作業対象物の存在する領域の候補としてリストに仮登録する。誤認識を除外するため、Nフレーム連続して重なった領域のみを作業対象物の存在する領域としてリストに本登録する。その際、以降のフレームでその領域に存在する作業対象物が手振れ等によって移動したとしても、テンプレートマッチングにより作業対象物を追尾してアノテーションを表示するため、領域内の画像をテンプレート画像としてリストに記録しておく。テンプレートマッチングでは、リストに登録された画像データと一致する領域が検出された場合に、その領域に枠線とナンバリングによるアノテーションを表示している。表示例を図6に示す。

また、テンプレートマッチングによりMフレーム連続で一致する領域が検出できない物体は、リストから削除している。以上の物体検出アルゴリズムの実装に当たっては、コンピュータビジョン用のライブラリであるOpenCV[13]を利用した。



図6 アノテーション自動生成の例

4.3 システムの予備評価

4.2で述べたアノテーション自動生成機能について予備評価を行ったところ、作業時間に大幅な遅延が生じた。その要因として、物体検出とテンプレートマッチングの処理負荷がスマートフォンにとっては非常に大きいこと、そのため、フレームレートが極端に低下したことが考えられる。

フレームレートが低下すると、指導者側と作業員側の映像のコマ数が低下することから、作業員が作業対象物を映し出してからアノテーションが自動生成されるまでの間、指導者が指示を行うことができず待機時間が増大してしまう。したがって、作業時間の遅延に影響したと考えられる。

実際に数機種 of スマートフォンを用いてフレームレートを測定した結果、物体検出を行うと極端にフレームレートが低下し、さらにテンプレートマッチングを行うと、フレームレートが全ての機種において1.0fpsを下回ることが分かった。

4.4 モジュール配置場所の変更

上述の問題点を改善するため、アノテーション自動生成モジュールの配置場所を、作業員側のスマートフォンから中継サーバに移動する。これにより、フレームレートの向上が期待できる。変更後のシステム概要を図7に、動作シーケンスを図8に示す。また、変更後のシステムでは中継サーバ内で物体検出とテンプレートマッチングの処理を行うことから、サーバ側の物体検出プログラムの記述はJAVA言語を用い、作業員・中継サーバ間の通信方式をTCP Socket通信に変更した。

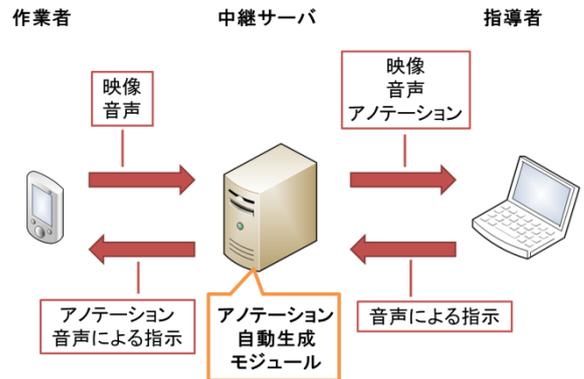


図7 配置場所変更後のシステム概要

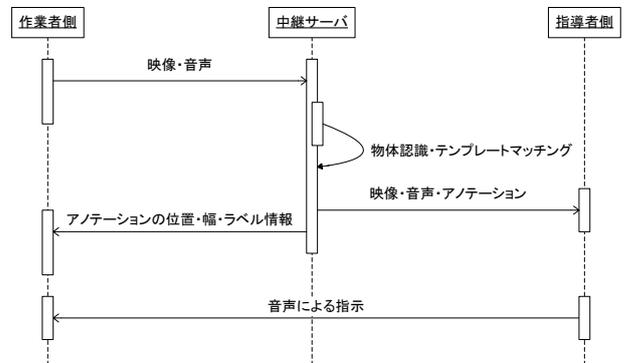


図8 配置場所変更後の動作シーケンス

アノテーション自動生成モジュールの配置場所変更に伴う、システムの動作シーケンスの変更を説明する。まず、

作業者が撮影したフレーム画像が中継サーバに送信され、中継サーバ内で物体検出とテンプレートマッチングの処理が行われる。処理終了後、作業側にはアノテーションの位置情報（検出領域の左上座標と幅・高さ）とラベル名が返信され、指導者側にはアノテーションが書き込まれたフレーム画像が送信される。

以上のように、中継サーバで物体検出処理を行うことにより、処理速度の向上が期待できる。一方、スマートフォンと中継サーバ間のネットワーク遅延等により、作業側のスマートフォンにおいて中継サーバへの送信とは非同期的にプレビュー表示している映像と、中継サーバから返信されたアノテーションにはタイムラグが生じる。結果的に、作業側のスマートフォンにおいて作業対象物とアノテーションの表示位置にずれが生じる可能性がある。表示位置のずれは、指示された作業対象物の誤認につながるため、どの程度のタイムラグが生じるかを定量的にモデル化し、評価する必要がある。

5. 評価実験

本章では、作業側のスマートフォンで物体検出とテンプレートマッチングの処理を行った場合のフレームレートと、中継サーバ内で処理を行った場合のフレームレートを測定し、比較する。また、中継サーバ内で処理を行う場合に、スマートフォンと中継サーバ間のネットワーク遅延等により、作業側のスマートフォンにおいて表示している映像と、中継サーバから返送されたアノテーションにどの程度のタイムラグが生じるかを、ネットワーク遅延を変化させて測定した。

5.1 評価環境

測定に用いた機種とそのスペックを表1に、使用したサーバのスペックを表2に示す。

表1 測定に用いた機種とそのスペック

機種名	SH-13C	SO-02C	GT-I9100	A100
メーカー	SHARP	SONY	SAMSUNG	Acer
発売日	2011/8/6	2011/7/9	2011/5/1	2011/11/18
CPU	QUALCOMM Snapdragon MSM8255	QUALCOMM Snapdragon MSM8255	Samsung Exynos 4210"Orion"	NVIDIA® Tegra™ 2
動作周波数	1GHz	1GHz	1.2GHz	1GHz
コア数	1	1	2	2
メモリ	512MB	512MB	1GB	1GB
Android version	2.3.4	2.3.4	4.0.4	3.2.1

表2 サーバのスペック

CPU	動作周波数	コア数	メモリ	OS
Intel Core i7 970	2.80GHz	6	24GB	Windows Server 2012

5.2 タイムラグの評価方法

中継サーバ内で物体検出とテンプレートマッチングの処理を行った際に発生するタイムラグを定量的にモデル化し、計算するための方法について示す。計算に用いる各変数の説明を以下に示す。

- F_c : 作業側側のフレームレート (fps)
- F_s : 中継サーバ内のフレームレート (fps)
- T_c : スマートフォン内でフレーム画像を圧縮し送信するまでの処理時間 (sec)
- T_s : 中継サーバ内での物体検出の処理時間 (sec)
- RTT : ラウンドトリップタイム (sec)
- T_{diff} : タイムラグ (sec)

中継サーバ内のフレームレート F_s は、 T_s および T_c , RTT の和の逆数であり、

$$F_s = \frac{1}{T_s + T_c + RTT} \quad (1)$$

となる。また、タイムラグ T_{diff} は、中継サーバと作業側側のフレーム更新間隔の差であり、

$$T_{diff} = \frac{1}{F_s} - \frac{1}{F_c} \quad (2)$$

となる。

また、式(1)から F_s は RTT に依存しているため、 RTT の値によってタイムラグが変化する可能性がある。そこで、作業側のスマートフォンと中継サーバが同一のネットワーク内に存在するとしたローカル環境だけでなく、作業側のスマートフォンと中継サーバが地理的に離れた場所に存在するとした遠隔環境の双方において計測を行った。ただし、ローカル環境と遠隔環境で完全な同一性能の中継サーバを用意することは困難なため、ネットワーク遅延を人工的に生成する FreeBSD DummyNet を用いて、東京・大阪間を想定し片側遅延として 10msec を設定した。

5.3 結果

まず、作業側側のスマートフォンにアノテーション自動生成モジュールを実装した場合のフレームレートを測定した。表3に測定した結果を示す。計4機種側のスマートフォンとタブレット端末を用いてフレームレートを測定した結果、全ての機種において1.0fpsを下回る結果が得られた。

次に、中継サーバにアノテーション自動生成モジュールを実装した場合のフレームレートをローカル環境と遠隔環境に分けて測定した。ローカル環境の測定結果を表4に、遠隔環境の測定結果を表5に示す。

表3 作業側側にモジュールを実装した場合のフレームレート

SH-13C	SO-02C	GT-I1900	A100
0.43 fps	0.37 fps	0.81 fps	0.57 fps

表4 ローカル環境の測定結果

機種名	SH-13C	SO-02C	GT-II900	A100
F_c (fps)	6.59	6.10	13.91	10.44
F_s (fps)	1.98	2.05	3.87	3.88
T_{diff} (sec)	0.354	0.324	0.187	0.162

表5 遠隔環境の測定結果

機種名	SH-13C	SO-02C	GT-II900	A100
F_c (fps)	6.50	6.21	13.88	11.54
F_s (fps)	1.94	1.87	3.35	3.11
T_{diff} (sec)	0.363	0.374	0.226	0.235

ローカル環境と遠隔環境 (DummyNet により片側遅延 10msec に設定) の RTT を ping コマンドで測定したところ、ローカル環境の RTT は平均 1msec、遠隔環境の RTT は平均 24msec であった。

以上の結果から、中継サーバにアノテーション自動生成モジュールを実装した場合のフレームレート F_s は、作業側側にモジュールを実装した場合のフレームレートと比べて 4.6 倍～6.8 倍ほど向上していることがわかる。また、中継サーバにアノテーション自動生成モジュールを実装した場合、ローカル環境から遠隔環境に RTT の値を変化させることで、フレームレートの若干の低下やタイムラグのわずかな拡大が見られるものの、大きな差がないことが分かる。

6. まとめ

本研究では、遠隔作業支援システムにおいて作業側⇒指導者型の AR 活用について検討を行った。具体的には、作業側が撮影した映像から物体検出によって作業対象物を特定し、あらかじめマークとラベル番号によるアノテーションを書き込んだ上で、指導者に提示する。物体検出処理をスマートフォン内で行う場合と、中継サーバで行う場合の性能比較を行い、中継サーバでの処理が性能向上に有効であることを確認した。

今後、スマートフォンの性能向上によっては、スマートフォンで物体検出を行うべきか、中継サーバで物体検出を行うべきかを、ベンチマークにより動的に切り替えるなどの改良も考えられる。さらに、検出した物体にマークとラベル名からなるアノテーションだけではなく、センサ等から取得した様々な情報 (温度等) を重積して表示する手法も検討したい。

参考文献

- 1) G. Burnett, T. Wischgoll, V. Finomore, and C. Washington, "Initial Design of a Multimodal Collaborative Mobile Application for Real Time Decision Making," 16th International Conference on Computer Graphics and Virtual Reality (CGVR'12), July 2012.
- 2) 構造計画研究所, "Remote Guideware",

<http://www4.kke.co.jp/guideware/> (2012 年 10 月 19 日確認)

3) NEC, "Tele Scouter",

<http://www.nec.co.jp/solution/telescouter/> (2012 年 10 月 19 日確認)

4) NTT サービスイノベーション総合研究所, "遠隔コラボレーションシステム"

http://www.ntt.co.jp/svlab/activity/category_2/product2_23.html (2013 年 5 月 7 日確認)

5) 阪本, 鈴木, 湯瀬, 渡邊, "カメラ及びタッチパネルを有するスマートフォンを用いた遠隔地間作業指示支援", 情報処理学会研究報告, マルチメディア通信と分散処理 Vol.2010-DPS-142 No.47, 2010 年 3 月.

6) 阪本, 鈴木, 湯瀬, 渡邊, "スマートフォンによる遠隔地間作業指示支援システムの実装とその評価", 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル(DICOMO2010) シンポジウム, 2010 年 7 月.

7) 阪本, 鈴木, 湯瀬, 渡邊, "スマートフォンを用いた複数作業員に対応した遠隔地間作業指示支援システム", 情報処理学会第 73 回全国大会, 2011 年 3 月.

8) 阪本, 鈴木, 湯瀬, 渡邊, "複数作業員に対応した遠隔地間作業指示支援システム SPRInTx", 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム, 2011 年 7 月.

9) 大多和, 堀川, 佐野, 長沼, 渡邊, "複数作業員を対象とした遠隔地間作業指示支援システムにおける指導者側負担の軽減手法の検討", 情報処理学会研究報告, マルチメディア通信と分散処理 Vol.2012-DPS-153 No.9, 2012 年 11 月.

10) 大多和, 堀川, 佐野, 長沼, 古澤, 湯瀬, 渡邊, "作業対象物へのアノテーション自動設定機能を持った遠隔作業支援システムの検討", 情報処理学会第 75 回全国大会, 2013 年 3 月.

11) 渋沢, 渡邊, 酒井, 湯瀬, 鈴木, "動作学習のための e-Learning システムの提案", 日本 e-Learning 学会, 2007 年 11 月.

12) 渋沢, 渡邊, 佐藤, 岡本, 米樹, 湯瀬, 松浦, 青山, 鈴木, "客観的指標に基づく触診型動作の繰り返し学習支援システムの試作", 日本 e-Learning 学会, 2008 年 11 月.

13) OpenCV Wiki, <http://opencv.willowgarage.com/wiki/> (2013 年 1 月 10 日確認)

14) S. J. Henderson and S. Feiner, "Opportunistic Controls: Leveraging Natural Affordances as Tangible User Interfaces for Augmented Reality," Virtual Reality Software and Technology (VRST)'08, October 2008.

15) S. J. Henderson and S. Feiner, "Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret," IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2009 Science and Technology Proceedings, October 2009.

16) S. Henderson and S. Feiner, "Opportunistic Tangible User Interfaces for Augmented Reality," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 16, no. 1, January/February 2010.

17) S. J. Henderson and S. Feiner, "Augmented Reality in the Psychomotor Phase of a Procedural Task," IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2011 Science and Technology Proceedings, October 2011.

18) S. Henderson and S. Feiner, "Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 17, no. 10, October 2011.

19) 八木ら, "コンピュータビジョン最先端ガイド I", アドコム・メディア株式会社, 2008 年.