論文

高速点滅 LED マーカと複数の RGB-D センサを用いた遮蔽領域を提示可能な任意視点重畳映像生成システム *

井倉幹大 ** 宮下令央 ** 山下　淳 *** 石川正俊 ** 淺間　一 ***

Occulusion-Free Video Superimposing System from Arbitrary Viewpoint Using a High-Speed Blinking LED Markers and Multiple RGB-D Sensors

Mikihiro IKURA, Leo MIYASHITA, Atsushi YAMASHITA, Masatoshi ISHIKAWA and Hajime ASAMA

The demand that a teleoperated robot performs tasks in hazardous area instead of humans has been grown recently. Conventional teleoperated robots are designed for operators to recognize the surrounding environment by presenting images from multiple cameras. However, a high level of skill is required to accurately grasp the situation by referring to multiple images simultaneously. To show understandable images to the operator, this paper proposes occulusion-free video superimposing system using a high-speed blinking LED markers and multiple RGB-D sensors. For superimposition of multiple RGB-D data with a small misalignment even from high-speed teleoperated robots, the proposed video superimposing system updates the relative pose at high speed by using blinking LED markers. Through the experiment, the blinking LED markers obtained the position with an accuracy of about 1 cm and the attitude with an accuracy of about 1°, and the update latency of the pose from the LED markers was 2.06 ms. Moreover, we also superimposed images with an update frequency of 60 Hz and an accuracy of about 1 cm. The high-speed feedback from LED markers realizes video superimposition with a small misalignment against high-speed pose fluctuation between RGB-D sensors.

Key words: superimposition, high-speed image processing, LED marker, pose estimation

1. 序　　論

工事現場や災害現場など，人間が作業するには危険と判断される場所において，人間の代わりに作業を実行する遠隔操作ロボットの需要が高まっており，実際に災害現場で活用されるようになった．例えば，災害現場での運用を想定されたアームロボット Warrior は，東日本大震災後の福島第一原子力発電所の内部調査に使用され，操作者が遠隔で操作することによって被ばく累積を減らすことに貢献した [1]．

ロボットを遠隔操作する際，ロボットに搭載されているカメラからの映像を通して，操作者がロボット周囲の環境を認識できるようにするシステムが一般的に用いられる [2]．しかし，作業対象物が障害物によって遮蔽されている場合や，カメラの視野外に存在する場合，操作者は作業対象物を認識することが困難になる．そのため従来の遠隔操作ロボットは，複数のカメラを搭載し，それぞれのカメラで得られた映像を提示することで，ロボットの周囲環境を様々な角度から認識できるように設計されている [2,3]．このように，複数のカメラから操作者が認識できる領域を拡大することができる一方，操作者は複数の映像を比較して正確に状況を把握する高い技術が要求される [4]．

そこで，操作者が理解しやすい映像提示を行うために，隠消現実感 (Diminished Reality) の技術で複数の映像を重畳し，1 つの映像を生成する遮蔽物透過システムが提案されている [5][6]．隠消現実感は，人物や障害物など，映像上で視覚的に不要な物体を人為的に消去または透過する映像を生成する技術であり [7]，建物の透視 [8] や Google ストリートビュー [9] など広く応用されている．この遮蔽物透過システムは，ロボットアームの土台と先端にそれぞれ RGB-D センサを取り付け，それぞれのセンサでは遮蔽されて見えない部分を補い合うことで，作業対象物を認識している [5]．さらに，ロボットアームの関節角度から，2 つの RGB-D センサの相対位置姿勢を計算し，得られた 2 つの点群を重畳することで，遮蔽物を透過した任意視点の映像を平均 10.2 Hz の更新周波数で提示している．しかし，このシステムでは，ロボットアームを 0.05 m/s 程度の速度で動作させることで，システムのレイテンシによる重畳時の位置ずれを小さく維持できていると考えられる．すなわち，システムのレイテンシが大きい場合，ロボットの位置姿勢が瞬間的に変動した時，重畳時の位置ずれも瞬間的に大きくなり，結果として提示される映像から正確に状況を把握することが困難になると考えられる．

瞬間的に位置姿勢が変動するロボットの一例として，無人飛行ロボット (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) が挙げられる．一般に UAV は空力を用いて位置姿勢を制御するため，地上に固定されたロボットと比較して，低速移動を維持することは難しい．さらに，空中で常に外乱を受けるため，瞬間的に位置姿勢が変動する可能性もある．そのため，建機などの有人地上移動ロボット (Manned Ground Vehicle, MGV) から遮蔽された領域を有線給電 UAV を用いて認識することを目指した映像提示システムが提案されているが [10]，この UAV からの映像における視点の位置姿勢は常に低速に変化するとは限らず，瞬間的に変化することも考えられる．よって，操作者が理解しやすい映像提示を行う従来の任意視点の重畳映像提示システムを UAV に導入する場合，UAV の位置姿勢が瞬間的に変化しても映像重畳時の位置ず

*　原稿受付　令和 3 年 5 月 27 日
　　掲載決定　令和 3 年 11 月 29 日
**　東京大学大学院（東京都文京区本郷 7-3-1）
***　正 会 員　東京大学大学院（東京都文京区本郷 7-3-1）

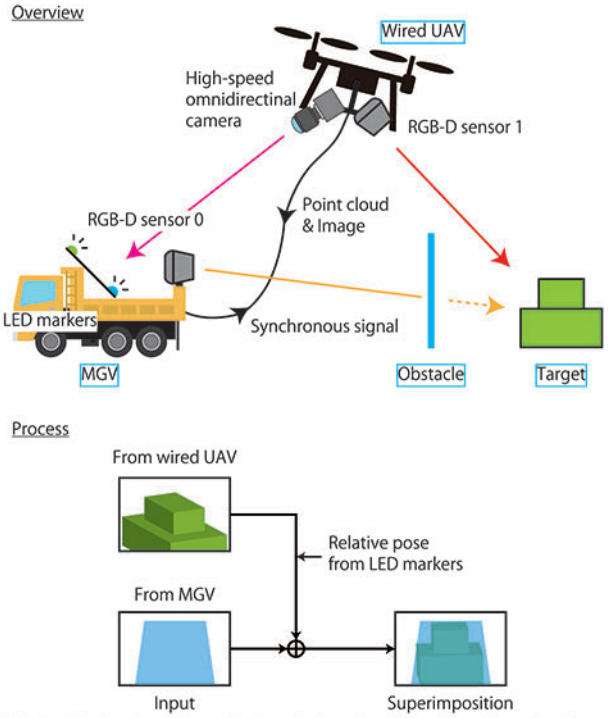


Fig. 1 Mission Overview with Occulusion-free Video Superimposing System

れを小さく維持するために，システムのレイテンシを小さくすることが求められる．

そこで本研究では，位置姿勢を高速に計測可能な高速点滅 LED マーカを導入した重畳映像提示システムを提案する．そして提案システムを用いたミッション例の全体概要を図 1 に示す．本システムでは，高速に移動する計算リソースの小さいロボットを UAV，位置が固定されている計算リソースの大きいロボットを MGV として定義する．今回想定するミッションでは，工事現場や災害現場で建機などの MGV が作業を実行する中，MGV の操作者が UAV を遠隔操作して MGV から見えない遮蔽領域の映像を空中から取得する．同時に，高速点滅 LED マーカを用いて MGV と UAV から得た三次元点群間の位置姿勢を計測する．計測した位置姿勢を介して 2 つの三次元点群を重畳することで，MGV の操作者が遮蔽領域の状況を正確に把握しやすい 1 つの任意視点映像を提案システムを通して生成する．この時，LED マーカを用いた位置姿勢の更新周波数が高いため，システムのレイテンシが小さくなることで，映像を取得する UAV の位置姿勢が外乱などで瞬間的に変動しても，位置ずれの小さい重畳映像を常に生成できる．

2. 関 連 研 究

2.1 任意視点映像提示システム

操作者が遠隔操作ロボットの周囲環境を認識するための任意視点映像提示システムが提案されている [11)12)]．小松らは，4 つの魚眼カメラとレーザレンジファインダー (LRF) を用いて，室内環境を遠隔操作で動く移動ロボットのための第三者視点の任意視点映像提示システムを提案した [11)]．このシステムでは，LRF を用いて得た距離情報を基に，室内環境を水平床と垂直壁でモデル化している．このモデル化した室内環境のテクスチャを 4 つの魚眼カメラで取得し，LRF を用いて事前に取得したロボットの 3D モデルを室内環境の正しい位置に配置している．これにより生成した三次元モデルを任意視点の映像として提示することができる．しかし，LRF や魚眼カメラは，すべて移動ロボットに搭載されているため，障害物によって遮蔽されている領域の映像を提示することはできない．

また，Jarusirisawad らは，多数のカメラを用いて，様々な角度から目標物の映像を取得し，周囲に障害物が存在しても透過する任意視点映像を生成するシステムを提案した [12)]．多数のカメラを用いることで，障害物を透過した映像を生成できる仮想的なカメラの設置可能領域を拡大することができる．しかし，このシステムでは，全てのカメラの位置姿勢は固定されているため，透過映像を作成できる領域にはカメラ位置に基づいた限度が存在する．

これらの関連研究に対し，提案システムでは，複数の RGB-D センサの相対位置姿勢を変動させることで，遮蔽領域の三次元点群を取得する．また，LED マーカを広視野の全方位カメラで撮像するため，マーカが視野内にある限り常に RGB-D センサ間の位置姿勢を更新し，結果として従来システムと比べて広い領域内で遮蔽領域を提示可能な任意視点映像を生成できる．

2.2 RGB-D センサを用いた三次元点群重畳

別のセンサを使用せず，RGB-D センサで取得した連続なフレームのみを用いることで，フレーム間の相対値姿勢を推定し，三次元点群を重畳する手法が多く提案されている．三次元点群を重畳する際のフレーム間の位置姿勢推定は主に，取得した三次元点群を用いる手法と，画像を用いる手法が存在する．三次元点群を用いる手法では，フレーム間の移動量が小さい仮定の基で ICP アルゴリズム [13)] 等を適用することで，蓄積された過去の三次元点群と現在取得した三次元点群の相対位置姿勢推定を効率良く行うことができる [14)15)]．一方で画像を用いる手法では，RANSAC[16)] などの外れ値除去処理を施した画像内の特徴量 [17)18)] や画像全体 [19)~21)] を用いた Visual odometry によってフレーム間の相対位置姿勢を推定することができる．いずれの手法においても，RGB-D センサの更新周波数程度の位置姿勢更新を実現できるが，瞬間的な位置姿勢変動が発生した際，画像にモーションブラーや三次元点群にノイズが入ることで，推定精度が悪化する．加えて，これらの手法は同一のセンサで取得した連続なフレーム間の相対位置姿勢を推定することが前提であり，本研究で提示したミッション概要のように，2 つの異なる RGB-D センサから取得した三次元点群や画像の共通部分が少ない場合は位置姿勢推定が困難になる可能性がある．

そこで本研究では，これらの問題を 2 つの RGB-D センサに加えて，高速全方位カメラと高速点滅 LED マーカを導入することで解決する．カメラのフレームレートが高いため，瞬間的な位置姿勢変動が起きても画像全体のモーションブラーが少なくなり，位置姿勢推定精度の悪化を防ぐことができる．そして，2 つの異なる RGB-D センサからの RGB-D データの共通部分の大小に関係なく，高速全方位カメラの視野内に LED マーカが存在すれば，位置姿勢を計測できる．

2.3 マーカを用いた位置姿勢計測

画像上のマーカ位置から対象の位置姿勢を計測する手法は，ロボット [22)] や AR[23)] など様々な分野で用いられている．AprilTag[24)] や ARToolkit[25)] は，四角形の中に模様や文字などが描かれている二次元マーカである．そのため，マーカそのものが簡単に作成可能であり，そのマーカをカメラ 1 台で撮像すれば，マーカとカメラ間の位置姿勢を計測することができるため，汎用性が高い．位置姿勢計測に加え，マーカ内部の模様を変更

することで，複数マーカそれぞれの識別も可能である．しかし，これらのマーカは，マーカ検出の際にマーカの模様をテンプレートマッチングで識別するため，画像処理に要する計算量が大きい．例えば AprilTag は，VGA の解像度でのマーカ検出の際の更新周波数は 30 Hz 程度である [24]．よって，高速に移動できるロボットが AprilTag を検出する場合，位置姿勢更新のレイテンシによる位置姿勢ずれが大きくなると考えられる．

また，再帰性反射材を用いたマーカも提案されている [26]．Dorfmuller らは，赤外カメラの上に設置した赤外光源から赤外光を再帰性反射材マーカに照射し，反射した赤外光を赤外カメラで撮像することで，可視光を用いた屋内の AR システムに干渉しない位置姿勢計測手法を提案した [26]．このシステムでは，赤外光の少ない屋内環境において赤外光をマーカに当て，光源に近い赤外カメラで赤外画像を取得している．この時，光を拡散せずに光源方向に反射できる再帰性反射材の特性によって，取得画像上にて再帰性反射材マーカ周辺のみ輝度が高くなる．これにより，小さい計算量でマーカの画像上の位置を取得することができる．その結果，赤外カメラのフレームレートを上げることで簡単に位置姿勢計測の高速化が可能になり，高速な位置姿勢計測を活かしたシステムが提案されるようになった [27]．しかし，再帰性反射材マーカをロボットに搭載する場合，再帰性反射材に対し光を当てる必要があるが，高速に動くロボットに対して常に赤外光を当てる続けることは困難である．

そこで本研究では，高速全方位カメラの撮像タイミングに同期した点滅をする LED をマーカとして利用する．この同期によって，LED が点灯した画像と消灯した画像が交互に取得できるため，2 つの画像の差分を取ると LED マーカ周辺のみが明るい画像ができる．結果として差分画像に閾値処理を施すことで，AprilTag のようなテンプレートマッチングによる識別処理をせずに小さい計算量でマーカを検出できる．さらに，再帰性反射材を用いたマーカのようにマーカに向かって常に光を当て続ける必要はないため，ロボットの位置姿勢が高速に変動しても高速全方位カメラの視野内にマーカがあれば，高周波数な位置姿勢更新を継続することが可能になる．

3. 提 案 手 法

3.1 システム全体概要

提案システムでは，UAV が取得した画像を用いて高速な三次元計測 [28][29] を将来的に行う検討があるという背景から，図 **1** のように UAV 側に 1 台の RGB-D センサと 1 台の高速全方位カメラ，MGV 側に 1 台の RGB-D センサと 4 つの高速点滅 LED マーカを搭載する．

提案システムで行われる処理は主に，複数の三次元点群を重畳して 1 つの任意視点映像を生成する処理と，高速全方位カメラと高速点滅 LED マーカを用いた位置姿勢計測処理の 2 つで構成される．この 2 つの処理は並列に実行されており，高速点滅 LED マーカを用いて高い更新周波数で位置姿勢を計測しつつ，複数の RGB-D センサの取得三次元点群が更新され次第，最新の位置姿勢を用いて位置合わせして 1 つに重畳される．これらの処理を計算リソースの大きい MGV 側で実行するため，UAV 側で取得した三次元点群と LED マーカの映った全方位画像は有線を介して MGV 側に送られる．さらに，画像から LED マーカを抽出する精度を向上させるため，MGV 側から有線を介して，高速点滅 LED マーカと高速全方位カメラの同期信号を送ることで，LED マーカの点滅の切り替えと，高速全方位カメラのシャッターを一致させている．

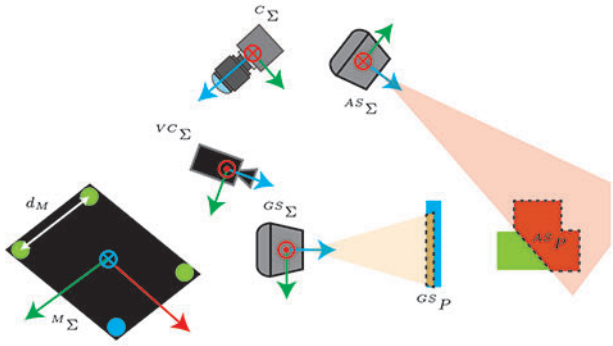


Fig. 2 Definition of Coordinates in Attached Sensors and LED Markers

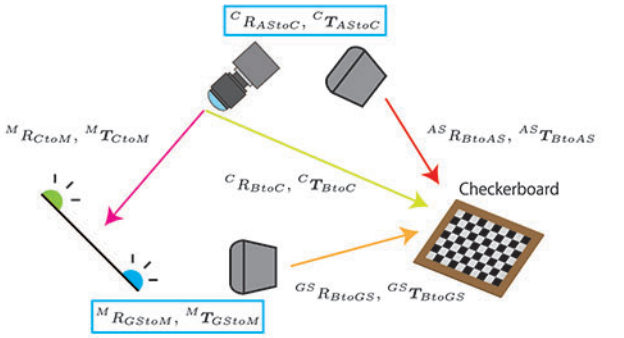


Fig. 3 Calibration Procedure for Extrinsic Parameters of Attached Sensors and LED Markers

3.2 遮蔽領域を提示可能な任意視点重畳映像生成

提案システムには，2 つの RGB-D センサと高速全方位カメラ，高速点滅 LED マーカがあり，それぞれについて定義した座標系を図 **2** に示す．最終的に提示される映像は，重畳した 2 つの RGB-D センサからの三次元点群を，図中の仮想カメラの位置から見た映像になる．まず，2 つの三次元点群 ${}^{AS}P$, ${}^{GS}P$ を 1 つの共通座標系に変換する．今回は共通座標系を MGV の RGB-D センサのカメラ座標系 ${}^{GS}\Sigma$ にする．ここで左の上付き文字は座標系を示す．本システムの動作時は，高速全方位カメラと高速点滅 LED マーカ間の位置姿勢のみ取得できる．そのため，事前のキャリブレーションでは，UAV 側の RGB-D センサと高速全方位カメラ間の位置姿勢 ${}^{C}R_{AStoC}, {}^{C}\boldsymbol{T}_{AStoC}$ と，MGV 側の RGB-D センサと高速点滅 LED マーカ間の位置姿勢 ${}^{M}R_{GStoM}, {}^{M}\boldsymbol{T}_{GStoM}$ を求める．ここで，位置姿勢の下付き文字 $AtoB$ は，座標系 A から B に変換する位置姿勢を示す．キャリブレーション後，2 つの三次元点群 ${}^{AS}P$, ${}^{GS}P$ を ${}^{GS}\Sigma$ 座標系に変換できるようになる．最後に，映像提示のために，全ての三次元点群を仮想カメラ座標系 ${}^{VC}\Sigma$ に変換する．${}^{GS}\Sigma$ と ${}^{VC}\Sigma$ の間の位置姿勢は，操作者が任意に変更することができる．

事前キャリブレーション手法の概要を図 **3** に示す．まずは 2 つの RGB-D センサと高速全方位カメラの内部パラメータをチェッカーボードを用いて求める．そして，2 台の RGB-D センサでチェッカーボードを撮像し，高速全方位カメラで LED マーカとチェッカーボードを同時に撮像する．この取得画像から求まる 4 つの位置姿勢を介すことで，MGV の RGB-D センサと高速点滅 LED マーカ間の位置姿勢 ${}^{M}R_{GStoM}, {}^{M}\boldsymbol{T}_{GStoM}$ と，UAV の RGB-D センサと高速全方位カメラ間の位置姿勢 ${}^{C}R_{AStoC}, {}^{C}\boldsymbol{T}_{AStoC}$ を求める．ここで，高速全方位カメラと LED マーカ間の位置姿勢の導出は 3.3 節で述べる．

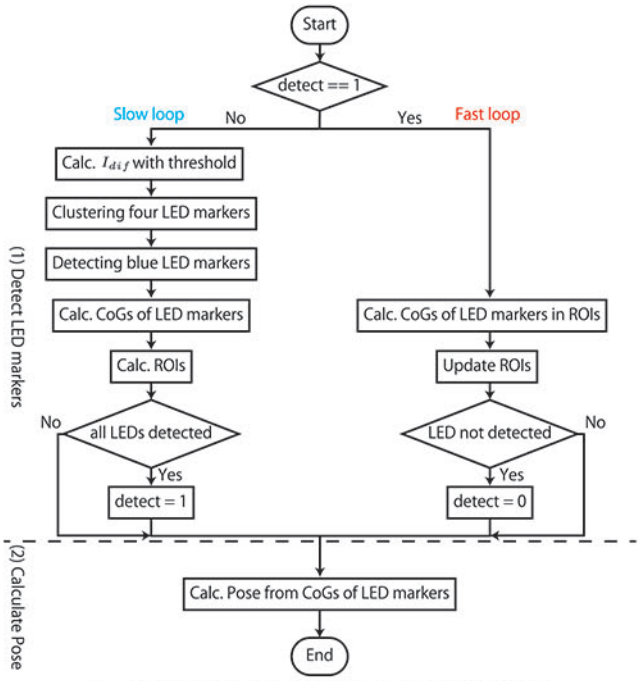


Fig. 4 Flowchart of Pose Calculation from LED Markers

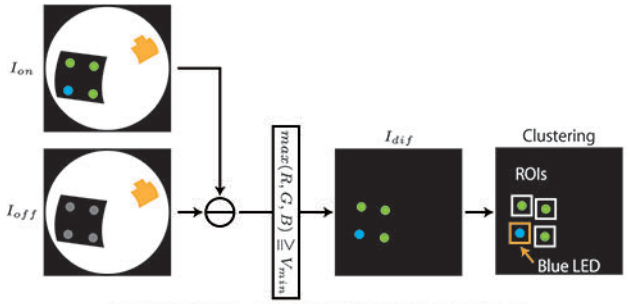


Fig. 5 Detection of All LED Markers in Slow Loop

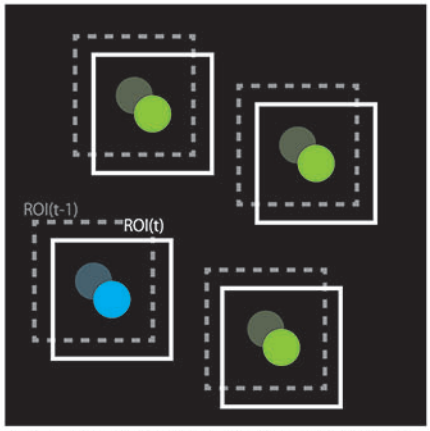


Fig. 6 Detection of All LED Markers in Fast Loop

3.3 高速点滅 LED マーカを用いた位置姿勢計測

提案システムで用いる高速点滅 LED マーカの概要と，定義したマーカ座標系 ${}^{M}\Sigma$ を図 **2** に示す．今回は，1 つの青色 LED と 3 つの緑色 LED を 1 辺 d_M の正方形の頂点に配置して LED マーカを作成する．そして，全ての LED を同じタイミングで点滅させ，そのタイミングと同期した撮像トリガーをカメラに送信する．この撮像トリガーによって，LED マーカが点灯した画像と消灯した画像が交互に取得される．

取得した LED マーカの画像を用いた位置姿勢計測の手順の流れを図 **4** に示す．本手法は，主に (1) 画像中から 4 つの LED マーカの輝度重心の画像座標をサブピクセル単位で計算する部分と，(2) 4 つの画像座標とマーカの幾何配置から位置姿勢を計算する部分の，2 つのパートに分けることができる．さらに，(1) を効率的に実現するために，前フレームから 4 つ全ての LED マーカの画像座標が未検出である場合と検出済である場合の 2 つのループ処理を設定する．LED が未検出である場合は，LED マーカが点灯した画像と消灯した画像の差分を取り，差分画像全体から LED を検出するための画像処理を行うため，低速なループになる．一方，LED 検出済の場合は，LED マーカが点灯した画像に対してのみ画像処理を施すことに加え，前フレームの情報を用いて画像処理を施す範囲 (ROI) を狭めることで，画像処理に要する計算量を減らし高速なループを実現する．いずれかのループ処理における LED マーカの検出判定に伴い，次に実行するループ処理を決定する．

LED 未検出の低速ループの詳細を図 **5** に示す．まず LED マーカが点灯している画像 I_{on} と，消灯している画像 I_{off} の差分画像 I_{dif} を作成する．画像取得が高フレームレートであるため，カメラの位置姿勢変動による周囲環境の輝度変化が小さくなり，差分画像において LED マーカ周辺のみ高輝度にすることができる．差分画像を計算後，差分画像の明度 V に対する閾値処理を全てのピクセルに対し行うことで，LED マーカを検出する．LED マーカの輝点が検出された時，検出した全てのピクセルに対して k-means 法を施し，画像座標に応じて輝点を 4 つにクラスタリングする．そしてクラスタごとに輝度重心を計算し，さらに画像 I_{on} の色相を用いてクラスタ内の画素を RGB それぞれに分類することで青色 LED のクラスタを判定し，マージンを持ってクラスタを囲むような 4 つの ROI を計算する．これらの処理の結果，①クラスタ数が 4 つ，②クラスタ間の距離が閾値以上離れている，③1 つのクラスタが青色 LED マーカ，の 3 つを満たしていた時，低速ループにおける LED マーカの検出成功と判定し，次のフレームでは計算した ROI を用いて LED 検出済の高速ループを実行する．

次に，LED 検出済の高速ループの詳細を図 **6** に示す．このループ処理では，前フレームで検出された LED マーカの位置に応じた ROI の範囲内に，画像処理を施す範囲を狭めることで，LED 未検出時における差分画像生成やクラスタリングなどの処理を省き，高速な処理を実現できる．また，画像取得が高フレームレートであることから，フレーム間での LED マーカの位置変動が ROI に対して十分に小さい．そのため，4 つの ROI 内部でそれぞれ閾値以上の輝点の輝度重心を計算し，その画像座標に基づいて ROI を更新することで，常に ROI 内部に LED マーカを維持することができる．輝度重心を計算する際に 4 つ全ての ROI 内部で閾値以上の輝度を持つ画素が存在した場合に検出成功と判定し，それ以外だった場合は次のフレームで LED 未検出の低速ループを実行する．

最後に，前述の 2 つのいずれかの処理にて取得した 4 つの LED の輝度重心の画像座標を用いて，図 **7** のような幾何関係を持つ高速全方位カメラと LED マーカ間の位置姿勢を計算する．この手法は，ARToolkit[25] の位置姿勢計算手法の一部と，魚眼カメラの投影モデル [30] を組み合わせたものである．まず，LED マーカの画像座標に投影モデルを適用し，カメラ座標原点から

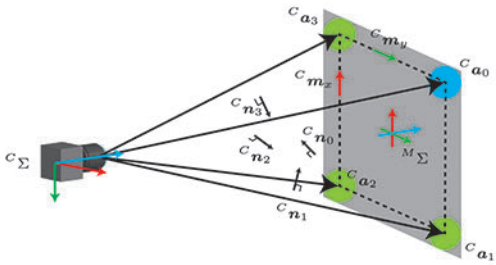


Fig. 7 Geometric Relationship between LED Markers and Omnidirectional Camera for Pose Calculation

LED マーカまでの 4 つの方向ベクトル ${}^{C}\boldsymbol{a}_{0,\ldots,3}$ を計算する．そして LED マーカは正方形に配置されていることから，4 つの方向ベクトルが四角錐の斜辺になることを利用すると，斜辺で作る 4 つの平面の法線ベクトル ${}^{C}\boldsymbol{n}_{0,\ldots,3}$ は，${}^{C}\boldsymbol{a}_{0,\ldots,3}$ を用いて式 (1) から計算できる．そして向かい合う法線ベクトルを用いると，カメラ座標系で見たマーカ座標系の X,Y 軸ベクトル ${}^{C}\boldsymbol{m}_x$, ${}^{C}\boldsymbol{m}_y$ を式 (2) から求めることができる．

$$ {}^{C}\boldsymbol{n}_i = {}^{C}\boldsymbol{a}_i \times {}^{C}\boldsymbol{a}_{\{(i+1) \bmod 4\}} \quad (i = 0, \ldots, 3) \tag{1} $$

$$ \begin{aligned} {}^{C}\boldsymbol{m}_x &= -({}^{C}\boldsymbol{n}_0 \times {}^{C}\boldsymbol{n}_2) \\ {}^{C}\boldsymbol{m}_y &= -({}^{C}\boldsymbol{n}_1 \times {}^{C}\boldsymbol{n}_3) \end{aligned} \tag{2} $$

この 2 つのベクトルから残りの Z 軸ベクトル ${}^{C}\boldsymbol{m}_z$ を求めることで，カメラ座標系からマーカ座標系への回転行列 ${}^{M}R_{CtoM}$ を計算できる．最後に残りのカメラ座標系からマーカ座標系への方向ベクトル ${}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM}$ を求める．このとき，式 (3) は LED マーカ $i\,(i = 0, \ldots, 3)$ の輝度重心のカメラ座標系からマーカ座標系への同次座標変換式を表す．さらに式 (4) は LED の輝度重心の画像座標系からカメラ座標系を計算する魚眼カメラの投影モデルを表す．

$$ \begin{pmatrix} {}^{M}x_{m_i} \\ {}^{M}y_{m_i} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|c} {}^{M}R_{CtoM} & {}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM} \\ \hline \boldsymbol{0} & 1 \end{array}\right) \begin{pmatrix} {}^{C}x_{m_i} \\ {}^{C}y_{m_i} \\ {}^{C}z_{m_i} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3} $$

$$ \begin{pmatrix} {}^{C}x_{m_i} \\ {}^{C}y_{m_i} \\ {}^{C}z_{m_i} \end{pmatrix} = \lambda_i \begin{pmatrix} u_i' \\ v_i' \\ s_0 + s_2\rho^2 + s_3\rho^3 + s_4\rho^4 \end{pmatrix} \tag{4} $$

ここで，u_i', v_i' は輝度重心の理想画像座標，λ_i はノルムを表す．そして $\rho = \sqrt{u_i'^2 + v_i'^2}$ であり，$s_{0\ldots4}$ は魚眼カメラの投影モデルにおけるパラメータを示す．式 (4) を式 (3) に代入し，未知数 ${}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM}$, λ_i に関して整理すると，以下の式 (5) が導ける．

$$ \begin{bmatrix} R\boldsymbol{x}_{01} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R\boldsymbol{x}_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \boldsymbol{x}_{03} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & R\boldsymbol{x}_{11} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & R\boldsymbol{x}_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & R\boldsymbol{x}_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ {}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{M}x_{m_0} \\ {}^{M}y_{m_0} \\ 0 \\ {}^{M}x_{m_1} \\ {}^{M}y_{m_1} \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{5} $$

このとき，$R\boldsymbol{x}_{ij}$ は $\{{}^{M}R_{CtoM}\,{}^{C}\boldsymbol{x}_{m_i}\}$ の j 行目を表す．式 (5) を疑似逆行列を用いて解くことで，${}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM}$ を求めることができる．

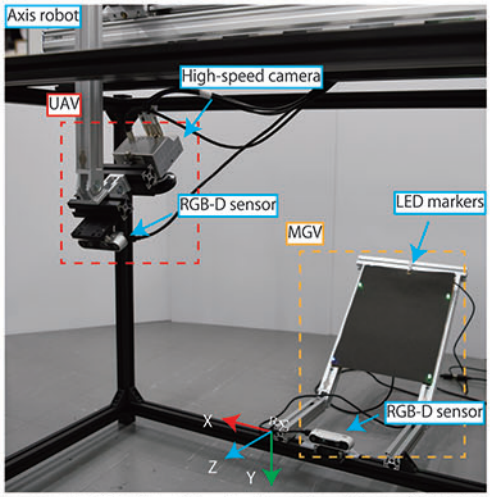


Fig. 8 Experimental Configuration for Superimposition of Multiple RGB-D data

4. 実　　験

4.1 実験環境

高速に移動するロボットからの映像を用いても，遮蔽領域を提示可能な位置ずれの小さい重畳映像を生成できる提案システムの有効性を検証するため，図 **8** に示す実験環境を構築した．この実験環境では，1 台の RGB-D センサは地上から，もう 1 台の RGB-D センサは空中から周囲環境の三次元点群を取得する．実験装置は，地上の MGV 側には解像度 848 px × 480 px に設定した RGB-D センサ (Intel, RealSense D435 @ 60 fps)，作成した高速点滅 LED マーカを設置した．今回の実験では，一辺 d_M が 235 mm の正方形の頂点に LED を配置し，マーカ座標系原点を正方形の中央に設定した．そして，実験結果の評価を簡単にするために，図 **8** に示すような基準座標系 ${}^{R}\Sigma$ を，地面に水平に固定されている MGV 側の RGB-D センサの座標系と同じになるように定義した．空中の UAV 側には MGV 側と同じ RGB-D センサと，解像度 896 px × 896 px に設定した高速カメラ (Optronics, CP70-2-C-1000 @1000 fps) に魚眼レンズ (Fujinon, FE185C086HA-1) を取り付けてシステムを構築した．この高速カメラで LED マーカの点滅を撮像するために，マイコン (mbed NXP, LPC1768) を用いて高速カメラと LED マーカの同期信号を生成した．そして，2 台の RGB-D センサと高速カメラを有線を介して PC (Intel Core i9-9900K @3.60 GHz) に接続し，得られた三次元点群と LED マーカの画像を PC 内で処理して重畳映像を提示した．また本実験において，空中を高速に移動する様子を模擬するために，1 軸の単軸ロボット (MISUMI, RSH220B-C21A-N-F1-5-700) に RGB-D センサと高速カメラを取り付けた．この単軸ロボットの移動方向は，基準座標系の X 軸方向と平行になるように設定した．以上により構成される実験環境では，2 つの RGB-D カメラ間の距離が 0.6 m 程度になり，RGB-D カメラの位置が変動していない状況下における LED マーカの輝度重心の 1 px のずれが，重畳する 2 つの点群の 2 mm 程度の位置ずれに変換される．

今回提案したシステムに実装するソフトウェアの概要を図 **9** に示す．このソフトウェアは 5 つのスレッドに分けられ並列に実行される．まず TakePic スレッドでは，高速カメラが 1000 fps で動作しているため，撮像タイミングと同期した LED マーカの画像を 1000 Hz の周波数でバッファに格納した．そして

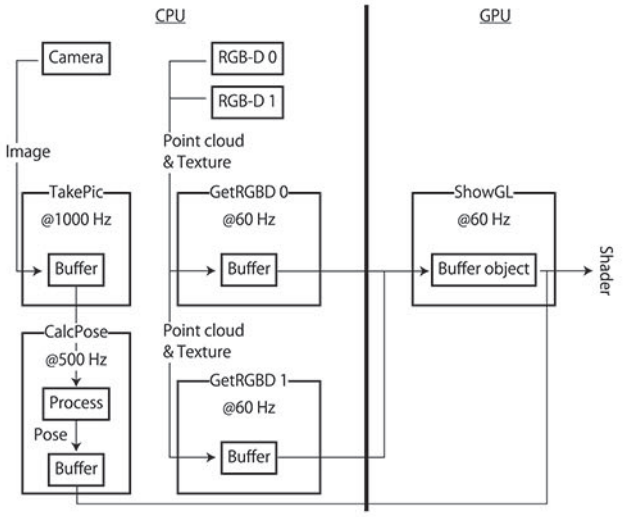
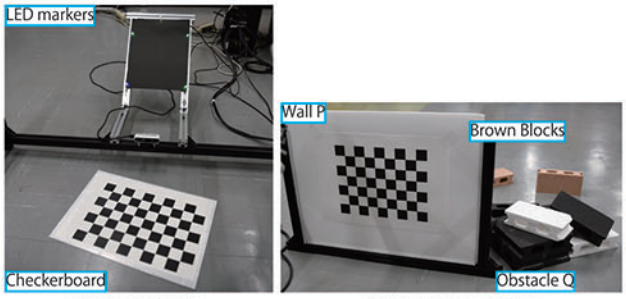


Fig. 9 Software Configuration for Video Superimposition



(a) Ex. A: Evaluation (b) Ex. B: Demonstration

Fig. 10 Measured Object in Experiment A and B

CalcPose スレッドでは，時間的に連続した LED が点灯した画像と消灯した画像を TakePic スレッドのバッファから呼び出し，計算した位置姿勢をバッファに 500 Hz の更新周波数で保存した．一方で GetRGBD スレッドにて，2 つの RGB-D センサから，三次元点群とテクスチャをバッファに 60 Hz の更新周波数で格納した．ShowGL スレッドでは，2 つの RGB-D センサからの三次元点群とテクスチャに加え，2 つの RGB-D センサ間の位置姿勢を CalcPose 内のバッファから呼び出し，60 Hz の更新周波数で GPU に送った．最後に GPU 内で，送られてきたデータをバッファオブジェクトを介してシェーダに入れて，重畳映像として出力した．このソフトウェアにおいて，RGB-D センサに対して外部同期信号を用いることで，位置姿勢更新周波数を RGB-D センサの更新周波数 60 Hz に合わせることが可能であるが，より高速な三次元計測システムを搭載する検討を考慮して，500 Hz の高速な位置姿勢更新を実現した．RGB-D センサの更新周波数 60 Hz に対して高速点滅 LED マーカからの位置姿勢更新周波数が 500 Hz と十分高いため，2 つの RGB-D センサを同期せずに，RGB-D センサから得た三次元点群の重畳時における位置姿勢更新のレイテンシによる位置ずれを小さくすることができる．

実験前に，提案システムに対して，3.2 節で述べた事前キャリブレーションを行った．高速全方位カメラの内部パラメータは，様々な角度から撮像したチェッカーボードの画像を用いて求めた．一方で，RGB-D センサの内部パラメータに関しては製品として出荷時に計測され，センサ内に保存されている値を利用した．また，一般的に RGB-D センサは RGB センサと深度センサを組み合わせたものであるが，これらの 2 つのセンサ間の外部パラメータに関しても出荷時に計測されているため，センサ内に保存されている値を利用した．

4.2 実験詳細

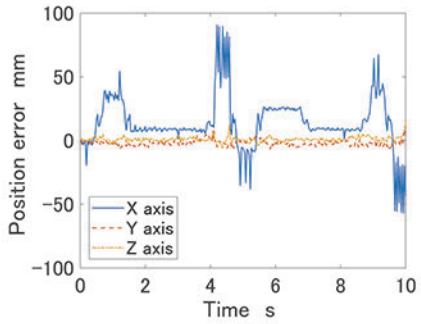
本研究では，提案システムの有効性検証のために 2 つの実験 A，B を行った．実験 A では，高速点滅 LED マーカの位置姿勢更新の周波数を (i) 30 Hz と (ii) 500 Hz に設定した場合での位置姿勢の精度を評価した．提案した高速点滅 LED マーカの更新周波数の最大値と AprilTag[24] の値程度に更新周波数を下げた場合の位置姿勢精度を比較することによって，空中を高速に移動する UAV から映像取得を行う状況における高速点滅 LED マーカの有効性を示す．位置姿勢精度を計算する際，実験 A では図 **10** (a) のように LED マーカの近くに設置したチェッカーボードを計測対象とした．実験 A の手順において，まず UAV 側に搭載されている高速全方位カメラでチェッカーボードと LED マーカの両方を画角内に収めて撮像した．この撮像した画像から，チェッカーボードと高速全方位カメラ間の位置姿勢 ${}^{C}R_{BtoC}$, ${}^{C}\boldsymbol{T}_{BtoC}$ と，高速全方位カメラと LED マーカ間の位置姿勢 ${}^{M}R_{CtoM}$, ${}^{M}\boldsymbol{T}_{CtoM}$ を取得することができる．そして，この 2 つの位置姿勢を介して，チェッカーボードと LED マーカ間の位置姿勢 ${}^{M}R_{BtoM}$, ${}^{M}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ を計算した．単軸ロボットを使って高速全方位カメラを 10 秒間動かした状況下でこの処理を繰り返すことで，時間変動した ${}^{M}R_{BtoM}$, ${}^{M}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ を取得する．このとき，チェッカーボードと LED マーカはワールド座標系において固定されているため，${}^{M}R_{BtoM}$, ${}^{M}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ の真値は高速全方位カメラの位置姿勢変動に関わらず常に一定となる．そのためこの実験では，チェッカーボードと LED マーカ間の位置姿勢 ${}^{M}R_{BtoM}$, ${}^{M}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ の時間変動分を基準座標系に座標変換した位置姿勢 ${}^{R}R_{BtoM}$, ${}^{R}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ を計測誤差として評価した．加えて，高速点滅 LED マーカの更新周波数を (ii) に設定した時における位置姿勢更新時間の実測値を評価するため，LED マーカから位置姿勢を計算する CalcPose スレッドの処理時間を計測した．

実験 B では，提案システムを用いて，実際に遮蔽領域を提示可能な重畳映像を生成した．本実験における計測対象を図 **10** (b) に示す．チェッカーボードを貼り付けた壁 P を前方に設置し，その周囲に白黒ブロックを障害物 Q として設置する．そして，今回の作業対象物として 2 つの茶ブロック A，B を奥に設置した．MGV 側の RGB-D センサからでは，茶ブロック A はチェッカーボード付きの壁 P に遮蔽されて見えず，茶ブロック B も障害物 Q に遮蔽されて見えない．そのため，UAV 側の RGB-D センサを用いて空中から茶ブロック A，B の三次元点群を取得し，LED マーカから得られる相対位置姿勢を用いて重畳映像を作成する．本実験において，UAV 側の RGB-D センサは単軸ロボットを用いて，基準座標系の X 軸方向に 0.6-1.0 m/s の速度でランダムに移動させた．この速度設定は，ロボットアームを用いた従来の重畳映像提示システムの動作速度と比べて十分大きい[5]．また，壁 P に貼り付けたチェッカーボードを用いて，三次元点群で重畳した際のチェッカー模様の位置ずれを評価した．

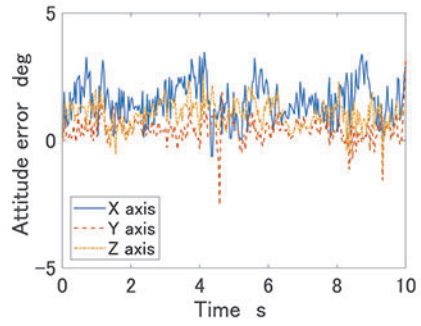
5. 結　　果

5.1 高速点滅 LED マーカによる位置姿勢計測精度評価

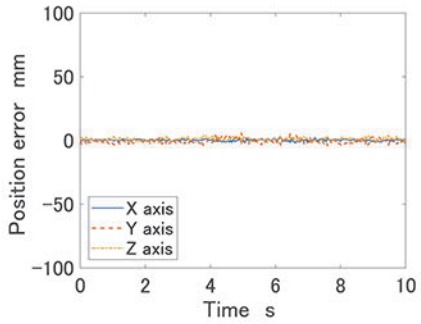
LED マーカの位置姿勢更新周波数を (i) 30 Hz と (ii) 500 Hz に設定した場合における，チェッカーボードと高速点滅 LED マーカ間の位置姿勢の基準座標系から見た変動



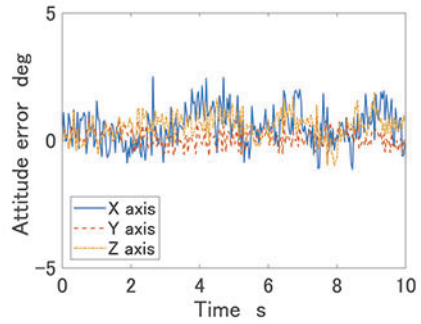
(a) Position Error at 30 Hz



(b) Attitude Error at 30 Hz



(c) Position Error at 500 Hz



(d) Attitude Error at 500 Hz

Fig. 11 Position and Attitude Error between Checkerboard and LED Markers

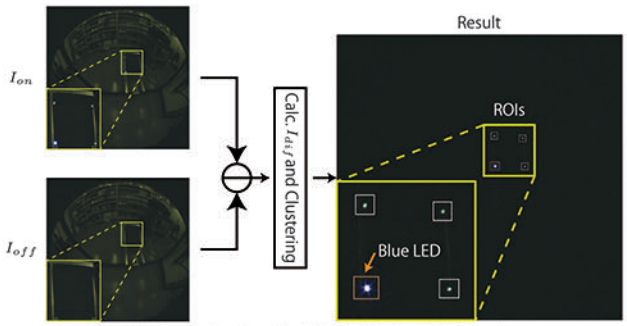


Fig. 12 Detection Result of LED Markers in Slow Loop

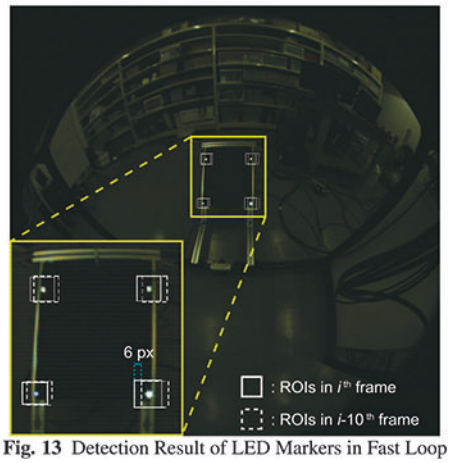


Fig. 13 Detection Result of LED Markers in Fast Loop

Table 1 Averages and Standard Deviations of Pose Estimation Error during Successful Detection of LED Markers

		Position mm			Attitude deg		
		X	Y	Z	X	Y	Z
(i) 30 Hz	average	14.11	-1.93	0.88	1.56	0.44	1.02
	standard deviation	13.72	2.30	1.76	0.77	0.45	0.53
(ii) 500 Hz	average	0.23	-0.50	1.07	0.53	0.12	0.55
	standard deviation	0.79	1.95	1.28	0.73	0.35	0.49

Table 2 Average Processing Time in CalcPose Thread

CalcPose	Slow	5.17 ms
	Fast	2.05 ms
	Total	2.06 ms

${}^{R}R_{BtoM}$, ${}^{R}\boldsymbol{T}_{BtoM}$ を図 **11** に示す．加えて，LED マーカ検出成功時における位置姿勢の変動の平均と標準偏差を，基準座標系の 3 軸それぞれに対して計算した結果を表 **1** に示す．図 **11** と表 **1** から，(ii) が (i) に比べて全体的に精度が良く，特に UAV 側の RGB-D センサの移動方向である X 軸の位置変動の平均と標準偏差が向上したことが確認できた．これは，位置姿勢更新のレイテンシが位置姿勢誤差に影響していることによるものであると考えられる．すなわち，LED マーカの位置姿勢更新周波数が 500 Hz と十分高いとき，画像を取得してから位置姿勢を更新するまでのレイテンシが小さくなることで，その間での単軸ロボットによる高速全方位カメラの移動量が小さくなり，結果として位置姿勢誤差が小さくなったと考えられる．さらにこの 10 秒間の検出処理結果を用いて，式 (6) で定義するマーカ検出成功率を計算した．

$$\text{マーカ検出成功率} = \frac{\text{検出成功と判定された画像数}}{\text{検出処理した画像数}} \times 100 \quad (6)$$

その結果，(ii) が 99.70 % であるのに対して，(i) が 92.55 % であった．検出処理において ROI を用いる高速ループの方が主に実行されていたことを考慮すると，このマーカ検出成功率の結果は，(i) における位置姿勢更新のレイテンシが大きく，その結果更新間での高速全方位カメラの移動量も大きくなり，LED マーカが ROI の外に出る回数が増えたためであると考えられる．以上より，更新周波数が 500 Hz の LED マーカの位置姿勢計測は，更新周波数の低い位置姿勢計測と比較して，位置は 1 cm 程度，姿勢は 1° 程度の小さい範囲の計測誤差に抑えることができた．

また，提案システムの CalcPose スレッドにおける処理時間の実測値の平均を表 **2** に示す．加えて，LED マーカ検出処理の低速ループと高速ループにおけるそれぞれの画像処理結果を図

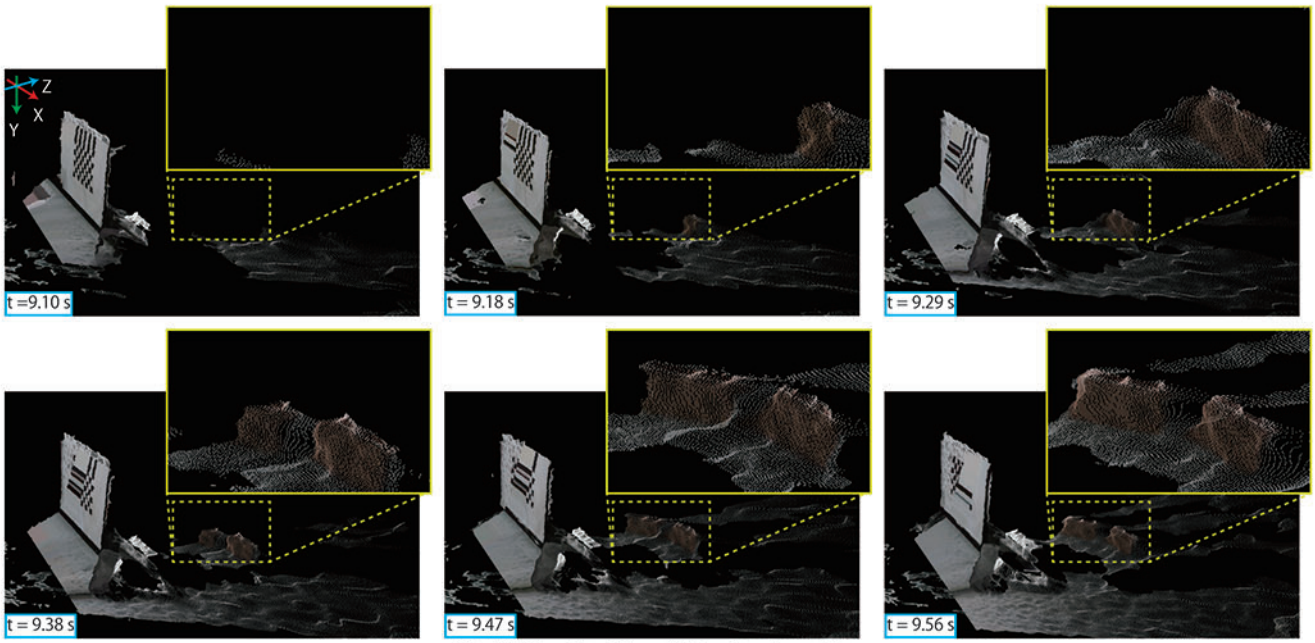


Fig. 14 Time Transition of Video Superimposition

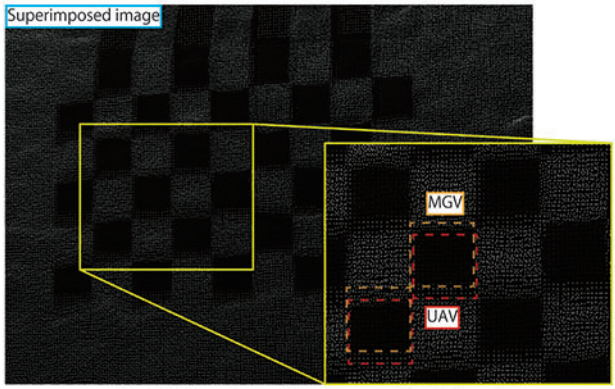


Fig. 15 Superimposition Error on Checkerboard

12，**13** に示す．低速ループでは，図 **12** のように LED 点灯画像と消灯画像の差分を計算することにより，LED マーカの点滅部分のみ高輝度の画像を取得した．これによって，LED マーカ部分のクラスタリング処理と青色 LED マーカの検出に成功し，輝度重心を中心にした 4 つの ROI を計算できた．一方高速ループでは，図 **13** に示すように，画像全体に対して十分小さい ROI を用いて LED の探索領域を狭めることで，画像全体から LED マーカの位置を検出する低速ループと比較して，計算時間が大幅に短縮された．さらに，図 **13** において，現在のフレームで計算された ROI と 10 フレーム前の ROI の位置変動が 6 px であったことから，フレームごとの LED マーカの位置変動が ROI の大きさに対して十分小さいことが確認できた．これによって，常に ROI 内部で LED マーカを検出して高速ループが低速ループと比較して十分多く繰り返されることで，CalcPose 全体の計算時間平均を 2 ms 程度に維持することができた．

5.2 遮蔽領域を提示可能な重畳映像生成実験

図 **14** に 2 つの RGB-D センサからの点群を重畳した映像の時間遷移を示す．UAV 側の RGB-D センサが壁 P 側にある時，三次元点群はチェッカーボード周辺に対して重畳されていた (t = 9.10 s)．そのため，MGV と UAV 両方の RGB-D センサを用いても，奥にある 2 つの茶ブロック A，B を認識できなかった．しかし，UAV 側の RGB-D センサが +X 方向に移動してくると，次第に壁 P の右側から三次元点群が取得されるようになり，障害物 Q の奥の茶ブロック B が映像に提示された (t = 9.29 s)．さらに進むと，UAV 側の RGB-D センサの視野が壁 P の奥側に回り込み，その奥にある茶ブロック A も映像に重畳された (t = 9.56 s)．このように UAV の位置が高速に変動しても，高速点滅 LED マーカを用いて高周波数で位置姿勢が更新されることで，位置変動によるずれを抑えつつ 2 つの三次元点群を重畳し，60 Hz の更新周波数の映像提示を実現できた．

また，2 つの RGB-D センサを用いて，提案システムから 1 m 程度離れた場所に設置したチェッカーボード周辺の三次元点群を重畳した際の取得画像を図 **15** に示す．チェッカー模様は 32 mm の正方形で構成されていることから，重畳した三次元点群の位置ずれは，1 cm 程度に抑えることができているのが確認できた．一方で，ロボットアームを用いた従来の重畳映像提示システムでは，1 m 程度離れた計測対象周辺の重畳映像が 3.5 cm 程度のずれを持っていた [5]．このことから，提案システムでは高速に動く RGB-D センサからでも，位置ずれの小さい重畳映像を提示することができたと考えられる．

6. 結　　論

本研究では，高速点滅 LED マーカと複数 RGB-D センサを用いた遮蔽領域を提示可能な任意視点重畳映像生成システムを提案した．高速点滅する LED マーカを高速全方位カメラで撮像することで，平均 2.06 ms で位置姿勢を更新でき，1 cm 程度の位置精度誤差，1° 程度の姿勢精度誤差で取得することができた．加えて，高周波数な位置姿勢更新によって，2 つの RGB-D センサ間の位置姿勢が高速に変動しても，三次元点群を位置ずれ 1 cm 程度に抑えて重畳し，60 Hz の更新周波数の映像として提示することができた．

今後の課題として，今回使用した RGB-D センサの RealSense D435 の代わりに，LED マーカの検出に使用した高速全方位カメラを利用して，より高速な三次元形状計測システム [28)29)] の導

入を検討している．今回 RealSense D435 は 60 Hz で深度計測を行ったが，RGB-D センサの位置が高速に変動している場合，RGB-D センサからの深度更新のレイテンシによる重畳映像のずれが存在する．高速点滅 LED マーカで 2.06 ms の高速位置姿勢更新が可能なことを活かし，より高速な三次元形状計測システムを導入することで，高速かつ位置ずれの小さい形状復元が可能であると考えている．

謝　辞

本研究の成果の一部はソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社との共同研究によるものである．

参 考 文 献

1) T. Battistini, R. Birmingham, C. Brown, K. Monti, T. Trainer, 山口一郎: ロボット技術の原子力産業事故対応および除染，復旧支援への活用性, 日本機械学会誌, **117**, 1151 (2014) 670.
2) M. Moteki, K. Fujino, T. Ohtsuki and T. Hashimoto: Research on Visual Point of Operator in Remote Control of Construction Machinery, Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2010) 532.
3) 古屋 弘, 栗生 暢雄, 清水 千春: 3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」, 大林組技術研究所報, **76** (2012) 1.
4) A. Nishiyama, M. Moteki, K. Fujino, and T. Hashimoto: Reserach on the Comparison of Operator Viewpoints between Manned and Remote Control Operation in Unmanned Construction Systems, Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2013) 772.
5) 橘高 達也, 藤井 浩光, 山下 淳, 淺間 一: 移動可能な RGB-D センサを用いた任意視点からの遮蔽物透視システム, 精密工学会誌, **83** 3 (2017) 235.
6) K. Sugimoto, H. Fujii, A. Yamashita, and H. Asama: Half Diminished Reality Image Using Three RGB-D Sensors for Remote Contorol Robots, Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, **43** (2014) 1.
7) M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi: Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology, Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2003) 348.
8) P. Barnum, Y. Sheikh, A. Datta, and T. Kanade: Dynamic Seethroughs: Synthesizing Hidden Views of Moving Objects, Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2009) 111.
9) A. Flores and S. Belongie: Removing Pedestrians from Google Street View Images, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2010 (2010) 53.
10) 永谷 圭司, 薬師川 楓, 桐林 星河, 渡辺 敦志: 土砂災害の初動対応を目指した無人建設機械の状態提示技術の研究開発―第一報：有線給電式マルチロータ機を用いた建設機械周囲の情報取得試験―, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (2016) 1.
11) R. Komatsu, H. Fujii and Y. Tamura, A. Yamashita and H. Asama: Free Viewpoint Image Generation System Using Fisheye Cameras and a Laser Rangefinder for Indoor Robot Teleoperation, Robomech J **7**, 15 (2020) 1.
12) S. Jarusirisawad, T. Hosokawa and H. Saito: Diminished Reality Using Plane-sweep Algorithm with Weakly-calibrated Cameras, Progress in Informatics, **7** (2010) 11.
13) S. Rusinkiewicz and M. Levoy: Efficient Variants of the ICP Algorithm, Proceedings of Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (2001) 145.
14) R. A. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. J. Davison, P. Kohli, J.Shotton, S. Hodges, and A. Fitzgibbon: KinectFusion: Real-time Dense Surface Mapping and Tracking, Proceedings of 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2011) 127.
15) M. Keller, D. Lefloch, M. Lambers, S. Izadi, T. Weyrich and A. Kolb: Real-Time 3D Reconstruction in Dynamic Scenes Using Point-Based Fusion, Proceedings of 2013 International Conference on 3D Vision (2013) 1.
16) M. A. Fischler and R. C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communications of the ACM, **24** (1981) 381.
17) G. Klein and D. Murray: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium Mixed and Augmented Reality (2007) 225.
18) K. Konolige, M. Agrawal, R. C. Bolles, C. Cowan, M. Fischler, and B. Gerkey: Outdoor Mapping and Navigation Using Stereo Vision, Experimental Robotics, **39** (2008) 1.
19) C. Kerl, J. Sturm, and D. Cremers: Robust Odometry Estimation for RGB-D Cameras, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013) 3748.
20) C. Kerl, J. Sturm, and D. Cremers: Dense Visual SLAM for RGB-D Cameras, Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2013) 2100.
21) C. Kim, S. Lee, P. Kim and H. J. Kim: Time-efficient Dense Visual 12-DoF State Estimator Using RGB-D Camera, Proceedings of 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (2017) 130.
22) M. F. Sani and G. Karimian: Automatic Navigation and Landing of an Indoor AR. Drone Quadrotor Using ArUco Marker and Inertial Sensors, 2017 International Conference on Computer and Drone Applications (2017) 102.
23) F. Cosco, C. Garre, F. Bruno, M. Muzzupappa, and M. A. Otaduy: Augmented Touch without Visual Obtrusion, Proceedings of 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2009) 99.
24) E. Olson: AprilTag: A Robust and Flexible Visual Fiducial System, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011) 3400.
25) H. Kato and M. Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proceedings of 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (1999) 85.
26) K. Dorfmuller: Robust Tracking for Augmented Reality Using Retroreflective Markers, Computers and Graphics, **23**, 6 (1999) 795.
27) K. Fukamizu, L. Miyashita and M. Ishikawa: ElaMorph Projection: Deformation of 3D Shape by Dynamic Projection Mapping, Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2020) 164.
28) M. Ikura, L. Miyashita and M. Ishikawa: Stabilization System for UAV Landing on Rough Ground by Adaptive 3D Sensing and High-Speed Landing Gear Adjustment, Journal of Robotics and Mechatronics, **33**, 1 (2021) 108.
29) 井倉幹大, Pathak Sarthak, 山下淳, 淺間一: ダイレクトドライブモータを用いた計測範囲の能動的変更が可能な三次元形状計測システムの提案, 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (2020) 1396.
30) D. Scaramuzza, A. Martinelli and R. Siegwart: A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2006) 5695.