

## ARToolKit とネットワークカメラを用いた AR 環境の構築と 高倍率ズーム活用のための基礎検討

### Fundamental study for Augmented Reality environment with high magnification zoom using ARToolKit and a network camera

中谷 俊輔†  
Shunsuke Nakatani

緒方 公一†  
Kohichi Ogata

#### 1. はじめに

拡張現実 (Augmented Reality, AR)[1]の技術は、エンターテインメントにとどまらず、日常の作業や生産活動における支援技術としても有益である。例えば、造船の現場での配管取り付け作業支援などに、確認作業の効率化や可視化の有用性・可能性を見ることができる[2]。

ARToolKit を導入することで、比較的手軽に AR 環境を構築できる状況となっている[3]。多くの場合、AR の利用では比較的近距离での利用を想定し、USB カメラが標準的に使用され、マーカの認識可能範囲に限られる。また、距離の離れた物体には大きなマーカを用意するなど制限や手間の問題、物体に対して巨大なマーカが付随する美観の問題などがある。Rabbi ら[4]は大きなマーカの内部に更にマーカを内包した階層型のマーカを用いることで、遠方と近距离での利用を可能とし、追跡範囲を拡張する方法を提案しているが、巨大なマーカを用意する必要がある。

このように、比較的近距离での使用を想定する AR 環境に対して、ズーム機能等を有するネットワークカメラが導入できれば、長距離での使用が可能な AR 環境の構築、ズームを利用したマーカの小型化と美観の確保、遠隔地でのイベント検出など、その応用展開により AR 技術の更なる活用につながると考えられる。そこで本稿では、ARToolKit とネットワークカメラを用いた環境構築と基礎的性能に関する実験について取り扱った。ネットワークカメラを ARToolKit に認識させる方法の検討、システムにおける遅延や倍率変更の影響、認識可能最大距離の調査、および、基礎調査の有効性について検討した。

#### 2. 環境構築

一般に AR の利用では比較的近距离での利用を想定し、USB カメラが利用される。そのため、ズームやパン・チルト機能を有し、LAN 接続で使用されるネットワークカメラが、そのまま利用できるとは限らない。実際、ARToolKit は USB カメラを用いるよう作られており、ネットワークカメラを認識しない。本研究では、ネットワークカメラ (Canon VB-M44、光学 20 倍、約 130 万画素、100Base-TX)を用いてシステム構築を試みた。当初、USB 接続の LAN アダプタの使用を試みたが、解決には至らなかった。そこで、ウェブカムソフトウェア ManyCam (Studio 版)[5]を導入した。このソフトウェアは、IP アドレスで指定したネットワークカメラの映像を取得し、その映像を仮想 USB カメラとしてパソコンに認識させる機能を持つ。この機能により、ARToolKit へのネットワークカメラの映像の取り込みを実現した。本研究で構築したシステムの全体像を図 1 に示す。使用したネットワークカメラでは、画角に関するパラメータを与えることで倍率を設定

†熊本大学, Kumamoto University

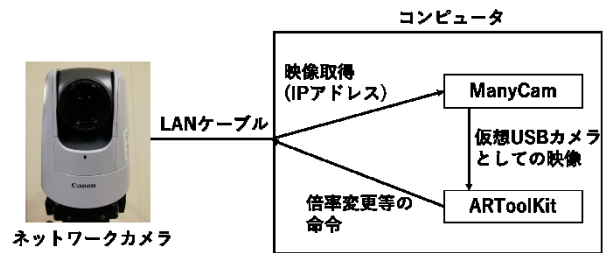


図 1 本研究で構築したシステム

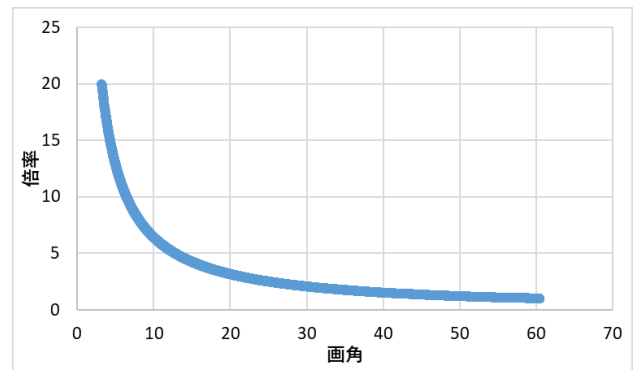


図 2 画角と倍率の関係のグラフ

するが、任意の倍率を設定できるようにするために、両者のパラメータの関係式を定式化する必要がある。そこで、画角に関するパラメータをネットワークカメラに送った際に設定される倍率の情報を読み取る作業を、プログラミング言語 Perl を用いてスクリプト処理[6]し、多数のデータの組を取得した。これより図 2 のグラフが得られ、モデル式

$$y = 68.98605x^{(-1.033406)} \quad (1)$$

が得られた (x 画角、y 倍率)。これより得られた、画角に対する倍率が表 1 となり、この値を本研究で用いる。また、ネットワークカメラには表 1 の画角を 100 倍したものを与える。さらに、事前準備として倍率 1、2、3、5、10、20 倍においてカメラキャリブレーション[7]を行った。

#### 2.1 遅延調査実験

時々刻々と変化するリアルタイムな状況をカメラで捉え ARToolKit の画面から出力する際、通信や画像処理により一定の遅延が発生する。リアルタイムな処理を行うため、システムで発生する遅延をあらかじめ把握し、リアルタイムな処理を行う際には対策を講じる必要がある。そのため、ここでは本システムがどの程度の遅延を有するかを調査した。

ノート PC (HP ProBook 650 G1、Intel(R) Core(TM) i5-

表 1 倍率と画角の関係

倍率	画角 [度]	倍率	画角 [度]
1	60.16	11	5.91
2	30.76	12	5.43
3	20.78	13	5.03
4	15.37	14	4.68
5	12.67	15	4.38
6	10.62	16	4.11
7	9.15	17	3.88
8	8.04	18	3.67
9	7.18	19	3.48
10	6.48	20	3.31



図 3 測定時の様子

表 2 測定結果

倍率	距離 [cm]	長さ [pixel]
1	20	150
2	40	151
3	60	152
5	100	154
10	200	155
20	400	145

4210M CPU @ 2.60 GHz 2.60 GHz、メモリ 8.00 GB)とネットワークカメラ(Canon VB-M44)を有線ブロードバンドルータの LAN ポート(100M)に接続する。実験環境の様子を図 3 に示す。ストップウォッチをネットワークカメラで撮影し、ARTToolKit の画面に出力されたストップウォッチの映像と比較することで時間差を求めた。図 3 のように、ストップウォッチとその映像を横に並べ、ストップウォッチを動作させた状態で、デジタルカメラで両者を含むように撮影した。肉眼では経過時間表示の読み取りが困難なため、写真に写った両者の表示時間を読み取り、その時間差を遅延として記録した。5 回の写真撮影を 1 セットの実験とし、

カメラのズーム倍率が 1 倍での実験を 2 セット、2 倍と 5 倍での実験を 1 セット行った。その結果、このシステムの遅延は倍率を問わず、0.29 秒であることが分かった。このことから、本構成を活用した応用システムを構築する場合は、0.29 秒程度の遅延を踏まえた取り扱いが必要となる。

## 2.2 ズーム倍率の違いによる取得画像の大きさへの影響

あるズーム倍率で物体をカメラで捉えた際の見かけの大きさと、倍率を変え、倍率の変化に比例する距離だけその物体を移動させたときの見かけの大きさは理論上同じになると考えられる。しかし、実際にネットワークカメラと ARTToolKit を組み合わせたシステムが理論どおりの動作をするとは限らない。そこで、理論とどの程度のずれが存在するのか、また、位置測定への影響を考慮しなければならないほどのずれの大きさなのかを調査した。

### 2.2.1 実験方法

一辺 3 cm の大きさの正方形が印刷された紙を用意した。ネットワークカメラ(Canon VB-M44)の位置を固定し、ARTToolKit を起動してズーム倍率 1 倍で正方形を撮影し、そのときの ARTToolKit 内に写る正方形の 1 辺の長さのピクセルサイズとカメラから正方形の印刷された紙までの距離を記録した。このときの紙の位置を初期位置とした。その後、倍率を変更し、変更した倍率分に比例する距離だけ初期位置から離れた位置に紙を置き、そのときの ARTToolKit 内に写る正方形の 1 辺の長さのピクセルサイズとカメラから正方形の印刷された紙までの距離を記録した。この動作を倍率 1、2、3、5、10、20 倍について行った。

### 2.2.2 実験結果と考察

結果を表 2 に示す。1 pixel の長さは約 0.18 mm である。これを踏まえ、表 2 から得られる長さのずれは、正方形を印刷した紙を置いた位置のずれと、長さを測定する際に生じた人為的な誤差であると考えられる。この結果から、倍率の違いによって見かけの大きさは変わらないといえる。これより各倍率でのカメラキャリブレーションは正確に行われており、距離測定などへの影響は無いと判断できる。

## 2.3 各倍率における認識可能距離検証実験

各倍率において、マーカの認識できる最小距離と最大距離を調査することによって、ネットワークカメラと ARTToolKit の組み合わせが生み出す性能の調査と、その性能から利用方法を導くための実験を行なった。

### 2.3.1 実験方法

ノート PC (HP ProBook 650 G1)とネットワークカメラ(Canon VB-M44)を有線ブロードバンドルータ (BUFFALO BBR-4HG)の LAN ポート(100M)に接続し、図 4 のように一式を台車に乗せ、移動可能な状態にした。このとき、カメラを台車の先端に配置した。0 m 地点にカメラの高さに合うようにマーカを設置し、台車を移動させることによってネットワークカメラで認識可能な最小距離と最大距離を調査した。このとき、マーカの位置を固定することによってマーカの照度が変わらないようにする。実験は、ズーム倍率 1、2、3、5、10、20 倍の 6 つの場合において行った。また、誤差を減らすため、実験を 2 回ずつ行い、平均を取ることによって精度を確保した。

実験に用いるマーカのサイズは、過去に研究室で USB



図 4 実験環境

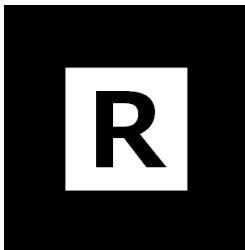


図 5 実験で用いるマークのデザイン

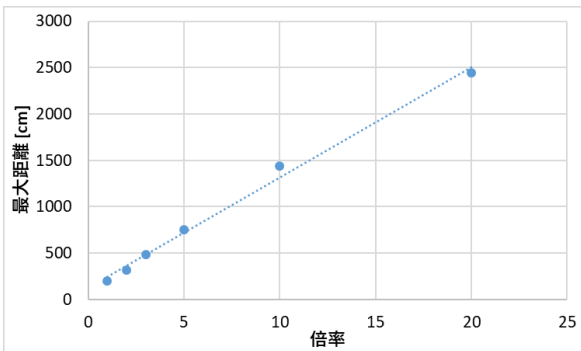


図 6 倍率と認識可能最大距離の関係

カメラを用いて行われたマークサイズと認識可能距離の関係[8][9]から計算し、20倍において約13m地点まで観測可能と推定される $2 \times 2$  cm (1辺2cmの正方形)のマークを用いて実験した。以降の実験で用いたマークのデザインを図5に示す。また、ARオブジェクトが安定して表示される限界の近さを最小距離、限界の遠さを最大距離と定めた。

### 2.3.2 実験結果と考察

得られた平均の倍率と認識可能最大距離の関係をグラフとして表示すると図6の結果となった。

実験結果は線形であるといえる。これより、認識可能最大距離、認識可能距離は倍率と比例することがわかる。この結果から、今回の実験で測定していないすべての倍率での認識可能最大距離、測定可能距離を算出することが可能であるとともに、マークのサイズを変えた場合においても、高倍率において実験で測ることができない距離でも、低倍率の距離を2点観測すれば結果が得られるといえる。

## 3. 高倍率ズームにおける遠距離での AR マーク利用の検討

これまでの実験で得られた結果を応用可能かどうか、また、高倍率で AR マークを認識可能かどうか検証した。それにより、応用利用の可能性を検討した。

### 3.1 実験方法

ノート PC (HP ProBook 650 G1)とネットワークカメラ (Canon VB-M44)、レーザ距離計 (BOSCH GLM150)を用いた。初めに、 $10 \times 10$  cm、 $11 \times 11$  cm、 $12 \times 12$  cm という少し大きめのマークを用意した。このマークは狭い屋内では高倍率のカメラでは最大追跡距離までマークをカメラから遠ざけることができない。しかし、低倍率であれば狭い屋内でもこの大きなマークを捕らえることができ、低倍率の測定で得られたデータから図6の関係を利用すれば、高倍率での最大認識距離を推定できると考えられる。そこでまずは低倍率を用いて屋内での測定を行い、高倍率での推定距離を求め、のちに実際に測定した高倍率での推定距離と比較を行った。マークの位置を固定することでマークの照度を一定に保ち、カメラ等の実験環境を組み立てた台車を前後に動かすことで、カメラのズーム倍率1倍と5倍でマークを捉えた際の認識可能最大距離を取得した。マークの設置地点を基準点(0 m)とした。図7のように、黄緑色の立方体が安定して表示される状態で、マークを認識していると判断した。この際、誤差を減らすため各計測を2回ずつ行った。このデータを元に2.3節の結果から得られた線形性の特性から比例関数を作り、各倍率での認識可能最大距離を推定した。

続いて実際に高倍率である10倍と20倍でそれぞれのマークを写し、マークが認識できる限界距離を探す。この実験では屋内での距離計測が不可能な長距離でマークを捕らえるため、屋外にマークを設置し、図8に示す実験環境を用いて屋内から撮影した。この実験環境を用いて $10 \times 10$  cm、 $11 \times 11$  cm、 $12 \times 12$  cmの各マークをそれぞれ10倍、20倍のズーム倍率を用いて撮影し、安定してARオブジェクトを表示することのできる限界距離を探した。このとき、撮影側は建物内、マークは屋内と離れているため、屋外でのマークの移動を協力者に依頼し、電話で連絡を取り合いながら実験を実施した。マークが安定して表示される限界の距離が見つかったと、その位置を認識可能最大距離としてレーザ距離計で測定した。ただし、本実験は日中に実施したが、レーザ距離計の出力の関係で、マークへの照射と測距は困難であった。そこで本実験では認識可能最大距離の位置にビニールテープを貼って位置を記録し、レーザによる距離測定は夜間に行うこととした。この際夜間にレーザの照射位置が目視できることとレーザを当てやすいことを重視して、記録していた位置にマークを再配置するのではなく、小型のホワイトボードをレーザの的として利用した。なお、マークやホワイトボードを保持する実験協力者や、屋外の通行人にレーザが照射されることがないように、実験協力者と電話での連絡体制をとり、安全面にも配慮して実験した。レーザ距離計を設置している様子を図9に示す。レーザ距離計による距離計測は $10 \times 10$  cm、 $11 \times 11$  cm、 $12 \times 12$  cmの各マークのそれぞれ10倍、20倍で記録していた各認識可能最大距離において3回ずつ計測を行った。その結果の平均と、計算から推定された10倍、20倍での



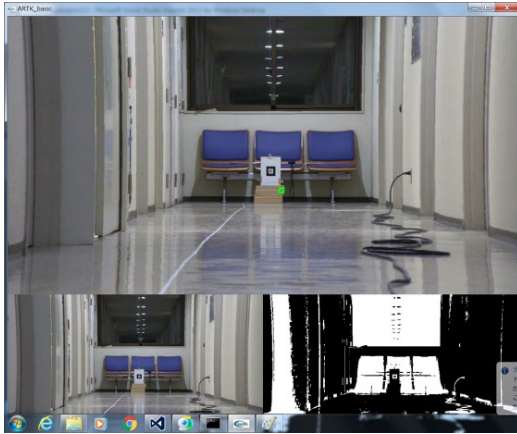


図 7 マーカをとらえている様子



図 8 屋内から屋外を撮影する実験環境を組み立てた様子



図 9 レーザ距離計を設置している様子



図 10 実験中の様子

認識可能最大距離を比較し、性能を評価した。実験中の様子を図 10 に示す。

表 3 10 倍での相対誤差

マーカサイズ [cm]	推定値 [m]	測定値 [m]	相対誤差 [%]
10×10	47.96	45.46	-5.2
11×11	48.29	47.41	-1.8
12×12	46.69	49.16	5.3

表 4 20 倍での相対誤差

マーカサイズ [cm]	推定値 [m]	測定値 [m]	相対誤差 [%]
10×10	95.89	89.21	-7.0
11×11	96.44	94.96	-1.5
12×12	99.30	95.96	-3.4

### 3.2 実験結果

推定により求めた距離を推定値、レーザ距離計で求めた距離の平均値を測定値として相対誤差を計算すると表 3、表 4 のようになる。

### 3.3 考察

表 3、表 4 より、相対誤差は±7%以下である。このずれが生じる原因として、レーザ距離計の設置上、カメラと少しずれた位置からの計測になったこと、また、推定に用いたデータとマーカの照度が異なることなどが考えられる。これらに起因するずれを考慮すると相対誤差は十分小さいといえる。これより、推定値と測定値は十分に近いといえる。あるマーカサイズにおける各倍率での追跡可能最大距離は線形性があるという 2.3 節での仮説は実証された。さらに、ARToolKit とネットワークカメラを組み合わせた実験環境では再現性があり、利用可能な特性であるといえる。

さらにこの実験結果から、10 cm から 12 cm といったサイズのマーカで 90 m 台の長距離での認識が行えることから、ARToolKit にネットワークカメラを導入することで、著しく大きなマーカを用いることなく、マーカの利用可能距離を大幅に拡大することが可能であるといえる。

## 4. キャリブレーション方法比較実験

ここまでの実験では ARToolKit での距離推定の正確さを優先するため、カメラの各ズーム倍率においてカメラキャリブレーションを行い、各倍率においてそれぞれのカメパラメータを適用してきた。しかし、この手法では AR オブジェクトの位置がずれるという問題が発生する。また、使用したい倍率すべてにおいてキャリブレーションをしなければならないという手間の問題や、キャリブレーションをするために長距離の直線空間を用意しなければならないという問題がある。カメラのズーム倍率 1 倍でのキャリブレーションにより得られたカメラパラメータをすべての倍率に適用することができれば、手間の軽減や取り扱いの簡易さという実用上の利点も大きい。そこで、カメラの倍率 1 倍のカメパラメータをすべての倍率において用いた際の推定距離の精度を調査し、すべての倍率において代替できないかを検討した。

### 4.1 実験方法

初めに、カメラとマーカの位置を固定した状態でカメラのズーム倍率 1 倍から 20 倍までにおいてマーカの認識が可能な距離とマーカサイズの条件を特定した。様々なマーカ

表 5 パターン A とパターン B の特徴

パターン A	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 1 倍のカメラパラメータをすべての倍率において利用</li> <li>➤ 倍率を上げる=近づいた状態に近い</li> <li>➤ 各倍率におけるレンズの特性を無視</li> <li>➤ AR オブジェクトの表示位置がずれない</li> </ul>
パターン B	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ それぞれの倍率においてキャリブレーションを実行</li> <li>➤ 空間を圧縮して認識</li> <li>➤ 各倍率におけるレンズの特性を考慮</li> <li>➤ AR オブジェクトの表示位置がずれる</li> </ul>

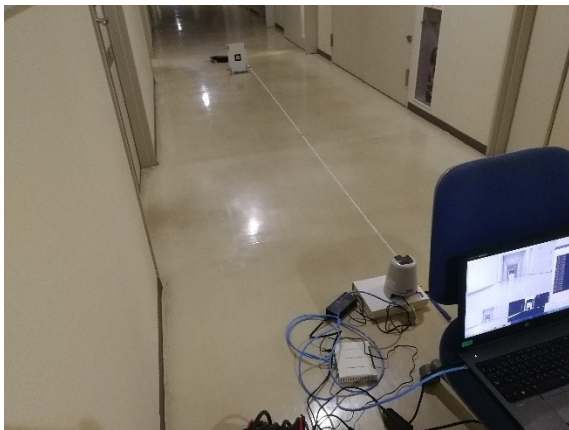


図 11 実験の様子

表 6 実験の条件

実験回数	3 セット
実験 1 セットに行う測定	各倍率 30 フレーム(1 秒間)の推定距離を 3 回ずつ
実験環境	毎回新規構築
使用倍率	1 倍、5 倍、10 倍、20 倍

サイズを用いて、それぞれのマーカでの 1 倍での最大認識距離と 20 倍での最小認識距離を調査し、特定を行った。

次に特定した距離とマーカサイズを用いて実験を行った。ここで、すべての倍率において 1 倍でカメラキャリブレーションを行った際のカメラパラメータを全倍率に用いた場合をパターン A、各倍率においてそれぞれカメラキャリブレーションを行い、それぞれカメラパラメータを適用した場合をパターン B とする。パターン A とパターン B での推定距離を測定し、その精度を確認、比較することを本実験とする。パターン A とパターン B の特徴をそれぞれ表 5 にまとめた。また、カメラキャリブレーションに関しては、3 節までの実験から時間が経過していたため、時間的要因を排除するために新たにカメラキャリブレーションを行った。実験で用いる条件は表 6 とする。また、実験の様子を図 11 に示す。

#### 4.2 実験結果

初めに、様々なマーカサイズを用いて、それぞれのマーカでの 1 倍での最大認識距離と 20 倍での最小認識距離を調査し、特定を行った実験の結果を表 7 に示す。1 倍での

表 7 1 倍での最大認識距離と 20 倍での最小認識距離の調査結果

マーカサイズ [cm]	倍率	最小距離 [m] (Min)	最大距離 [m] (Max)	Max-Min [m]
5	1		4.35	1.75
	20	2.60		
7	1		4.82	1.08
	20	3.74		
8	1		4.80	0.44
	20	4.36		
9	1		4.90	-0.03
	20	4.93		
10	1		4.97	-0.56
	20	5.53		

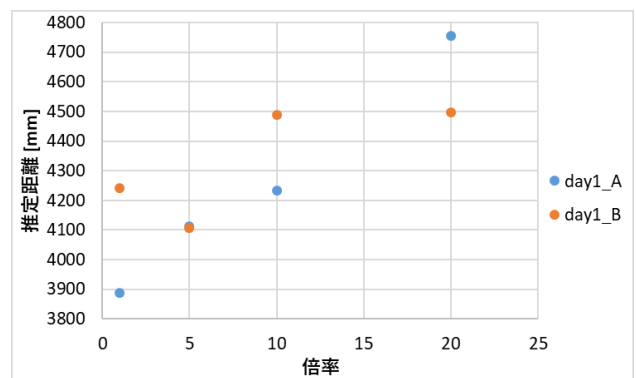


図 12 1 日目の結果

最大認識距離よりも 20 倍での最小認識距離の方が短ければ、距離を固定した状態で 1 倍から 20 倍までのズームでの認識が可能ということになる。表 7 より、8 cm よりも小さいマーカを利用した場合に最大認識距離から最小認識距離を引いた差が正となるため、この場合において固定距離からの認識が可能となることが分かった。この結果からここでは条件を満たし、かつ、1 倍と 20 倍でもともに認識可能な範囲がある程度確保可能な 7 cm のマーカを用い、カメラとマーカの距離を 4 m に固定して実験を行った。

7 cm のマーカを 4 m の距離から 1、5、10、20 倍で認識し、それぞれ 30 フレームの推定距離の平均を求める実験を 3 回ずつ実施し、すなわち 90 フレーム分の推定距離の平均を求めた。1 日目、2 日目、3 日目の結果を図 12~14 に示す。

図 12~14 より、それぞれの実験データにばらつきが出ており、これだけでは傾向が掴みにくい。そこで、3 日分のデータの平均を取ってプロットしたものを図 15 に示す。

#### 4.3 考察

図 15 より、パターン A とパターン B ではあまり誤差には違いがないことが分かる。1、5、20 倍においてパターン B の方が小さい誤差になっている理由としては、パターン A に比べてパターン B の方がカメラのレンズのゆがみなどの特性をキャリブレーションによって反映している分、より正確にマーカの大きさを捕らえることができているためであると考えられる。また、20 倍においてどちらのパターンでも誤差が大きい理由として、カメラの倍率をモデ

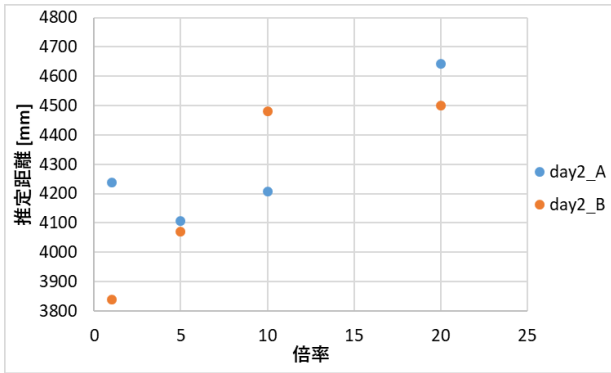


図 13 2 日目の結果

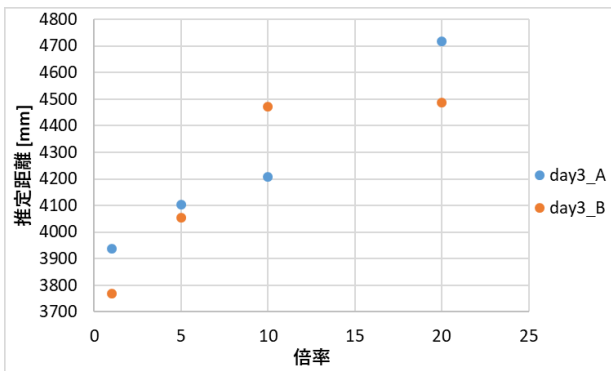


図 14 3 日目の結果

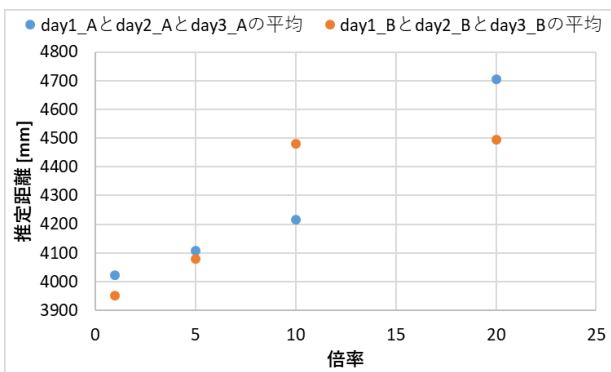


図 15 3 回分の実験結果の平均

ル化した際に、図 2 における、画角の変化に対する倍率の変化の感度の違いの影響の可能性と、推定距離は測定値を倍率倍したものを表示しているため、倍率が大きいほど誤差の影響が大きくなっている可能性が考えられる。しかし、遠方での距離認識においては、認識できるかどうかが最重要であり、推定距離の精度の重要性は近距離での場合より低い。また、パターン A を用いると AR オブジェクトの表示位置がずれない利点がある。さらに、遠方でのキャリブレーションを要しない利点は、近距離でのキャリブレーション後に、遠距離でのマーカ利用ができることを示しており、例えば接近が困難な災害現場での活用などに有効な特徴と考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、ネットワークカメラを ARToolKit で用いるための環境構築とその性能調査を行った。環境構築では、

ManyCam を導入し、ネットワークカメラを仮想 USB デバイスとして用いることで、ARToolKit で利用できることが分かった。また、10 cm 程度の正方形マーカを用いた場合、90 m 程度の距離認識を 7% 以内の精度の相対誤差で行なえることが分かった。このことから倍率と認識可能最大距離との間に線形性があることが確認できた。さらに、長距離での推定距離精度に精密さを求めないのであれば、1 倍でカメラキャリブレーションを行った際のカメラパラメータを全倍率で用いることで簡易性を高めることが可能であることが分かった。

今回、高倍率ズームも可能なネットワークカメラが利用可能になったことで、下記のような応用展開が考えられる。

- ・遠方におけるマーカ付着物体の存在提示の支援
- ・遠方からの物体の接近あるいは逆の動きの検出
- ・マーカ付着後に距離を置いた観察が要求される現場での利用
- ・ネットワークカメラのズーム、パン・チルト機能を生かした、イベント駆動システム開発
- ・ズーム倍率とマーカの大きさによる検出の可否を組み合わせた複合的な利用

今後、本実験での結果を踏まえ、ARToolKit とネットワークカメラの組み合わせを活用した応用開発を進めていく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 JP17K06464 の援助によることを記し謝意を表する。

## 参考文献

- [1] P. Lamb, "ARToolKit," HIT Lab, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, 参照 Jun. 27, 2018.
- [2] 日経 XTECH, "AR で作業を効率化する造船生産支援システム," <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/15/112001247/?rt=ocnt>, 参照 Jun. 27, 2018.
- [3] 橋本直, "3D キャラクターが現実世界に誕生! ARToolKit 拡張現実感プログラミング入門," ASCII, 東京, 2012.
- [4] I. Rabbi and S. Ullah, "Extending the tracking distance of fiducial markers for large indoor Augmented Reality applications," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Volume 15, Issue 2, pp.59-64, 2015.
- [5] "Free webcam software and screen recorder | ManyCam," <https://manycam.com/>, 参照 Dec. 1, 2017.
- [6] 西村文宏, "にししふあくとりー-Perl を使って特定の URL からファイルをダウンロードする方法," [https://www.nishishi.com/blog/2016/01/perl\\_wget\\_url\\_d.html](https://www.nishishi.com/blog/2016/01/perl_wget_url_d.html), 参照 Dec. 15, 2017.
- [7] P.R. Lamb, "ARToolKit Camera Calibration," HIT Lab, [http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/use\\_rcalibration.htm](http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/use_rcalibration.htm), 参照 Jun. 29, 2017.
- [8] 津々誉士, 緒方公一, "拡張現実におけるカメラ・マーカ距離と検出精度に関する基礎的検討," 平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会論文集, 08-1P-09, p.190, 2016.
- [9] 緒方公一, 大城美有紀, "AR マーカを用いた距離推定に関する予備的検討," FIT2017 第 16 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.243-244, 2017.