

平成29年度 修士論文

簡易レスポンスアナライザに適したARマーカの研究

平成30年2月13日

16350901

伊藤 学歩

指導教員 三浦 元喜 准教授

九州工業大学 工学府 先端機能システム工学専攻

## 概要

活発な双方向授業を実現するために、リアルタイム回答収集システムであるレスポンスアナライザシステムが広く研究されている。我々はその中でも、カメラとARマーカを用いる簡易レスポンスアナライザについて注目した。そのシステムでは生徒はARマーカをカメラに向けて回答を行うため、マーカが遮蔽されてしまうという問題がある。そこでマーカの一部隠蔽に強いランダムドットマーカというARマーカを採用した。また、学習活動の阻害を防ぐため、机に置いたまま回答を行う卓上立体方式のレスポンスアナライザを提案した。実際にそれを用いて回答を行ってもらい、手軽に回答を行えるシステムであることを示した。次に実際の授業に用いるための準備として、ランダムドットマーカの認識距離について調査を行った。また、レスポンスアナライザとして用いられるARマーカは、卓上立体方式の三角形の面に描かれていること、教室の奥まで認識が行えることという2つの要件を満たさなければならない。そこで、限定されたマーカ面積の中で認識距離を伸ばすためのドット認識手法の提案を行った。従来のドットの認識は重心を計算しているが、ドットの輪郭から中心の座標を計算することで、マーカ外にあるドットを認識することができる。このドット認識手法の精度と、マーカ認識率について評価を行った。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>3</b>
1.1 レスポンスアナライザシステム	3
1.1.1 レスポンスアナライザシステムとは	3
1.1.2 AR マーカを用いたレスポンスアナライザ	4
1.2 本研究の目的	5
<b>第2章 レスポンスアナライザにおける ランダムドットマーカの導入</b>	<b>6</b>
2.0.1 一般的な AR マーカ	6
2.0.2 ランダムドットマーカとは	7
2.0.3 ランダムドットマーカ認識手順	7
2.0.4 レスポンスアナライザとしてのランダムドットマーカ	8
2.0.5 不要なドットの削除	9
<b>第3章 卓上立体方式レスポンスアナライザの提案と評価</b>	<b>12</b>
3.1 概要	12
3.2 評価実験	12
3.2.1 実験環境	13
3.2.2 実験の流れ	14
3.2.3 アンケート項目	14
3.2.4 実験結果の分析	15
3.2.5 自由記述の分析	16
3.2.6 結果と考察	17

<b>第4章</b>	<b>認識距離についての考察</b>	<b>18</b>
4.1	認識距離の検証	18
4.1.1	マーカパラメータについて	18
4.1.2	実験環境	19
4.1.3	実験結果(マーカがカメラに正対している場合)	20
4.1.4	実験結果(マーカとカメラに角度がある場合)	21
4.1.5	考察	22
4.2	必要な認識距離について	23
4.3	考察とまとめ	24
<b>第5章</b>	<b>マーカ外に中心があるドットの認識</b>	<b>25</b>
5.1	概要	25
5.2	ドットの中心座標の計算	26
5.3	予備実験	27
5.3.1	概要	28
5.3.2	実験結果	28
5.4	マーカ外に中心を持つドットを含むマーカの認識	29
5.4.1	概要	29
5.4.2	実験結果	30
5.4.3	認識できたマーカと認識できなかったマーカの違い	30
5.4.4	考察	31
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>35</b>
	<b>謝辞</b>	<b>36</b>

# 第1章 序論

本論文では、カメラベースの簡易レスポンスアナライザシステムに適した AR マーカについて述べる。

この章では結論に至るまでの経緯として、レスポンスアナライザシステムの概要とそのシステムに採用した AR マーカについて説明する。

## 1.1 レスポンスアナライザシステム

双方向型授業を実現するために用いられるレスポンスアナライザシステムについて、また、これまでに開発されてきたレスポンスアナライザシステムについて説明する。

### 1.1.1 レスポンスアナライザシステムとは

双方向型の授業を促進する手法の一つとして、レスポンスアナライザシステムがある。レスポンスアナライザシステムの特徴は、学習者の意見や問題の回答などを即座に教師に集約できることである。また、匿名性を保った上での回答も可能であるので、口頭での発表と違い、学習者は間違いを恐れずに問題に対して回答できることも特徴である。答えが間違っていた場合、なぜ間違っていたかを学習者自身が考えることで学習効率が上昇し、教師も不正解である学習者の人数に応じて、授業展開の改善がリアルタイムで行える。このレスポンスアナライザシステムには、複数のボタンを備えているリモコンであるクリッカーツールやスマートフォンなどの電子デバイスが用いられることがある。クリッカーツールは、ボタンを有していることから択一問題に対する回答に長けている。国内外を問わず、多数の生徒がクリッカーを利用した双方向型授業の実現を評価している [1, 2]。また、クリッカーツールを利用した授業によって、学習者の英語能力の向上に繋がったことも報告されている [3]。スマートフォンやタブレット端末を用いたレスポンス

スアナライザは、それぞれのデバイスの通信環境が必要になるものの、自由筆記で学習者が教師または他の学習者に意見を伝えられることがクリッカーとは異なる特徴を持つ。スマートフォンをレスポンスアナライザとして用いた研究 [4] では、学習者同士による学び合いによる学習意欲の向上も見受けられたと述べられている。このように、電子デバイスを用いたシステムの有用性は実証されているが、授業を運営する教師への負担は大きい。普及してきたとはいえスマートフォンを学習者全員が持っているとは限らないこともあり、教師は授業の度にデバイスの用意、運搬、配布を行わなければならない。また、日常的にそれらのデバイスの充電や管理などを行う必要もある。さらに、大量の電子デバイスの購入のコストを考えると、レスポンスアナライザシステムが普通の授業に導入されにくいといったことも考える。

### 1.1.2 AR マーカを用いたレスポンスアナライザ

上記のような教師への負担を減らすために、AR マーカを用いたレスポンスアナライザシステムが研究されている [5, 6]。このシステムは、図 1.1 のように、教室前方に設置しているカメラに向かって AR マーカが印刷された紙を掲げることにより回答するシステムである。印刷された AR マーカは個人を識別できるように、それぞれ ID 情報を持っている。



図 1.1: AR マーカを用いたレスポンスアナライザシステム

また、回答をする際には AR マーカの向きを利用することが多い。[5] では、紙の四隅に黒いコードを印刷し、そのうち三つを向きの認識に用いて残り一つを個人の識別 ID として利用している。充電やメンテナンスが必要な電子デバイスに比べ、紙の方が管理が容易であり、また授業導入へのコストも紙にマーカを印刷することとカメラを備えた PC を用意すればよいので、電子デバイスを利用したシステムより比較的安価に収まる。

## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は、カメラベースの簡易レスポンスアナライザに適した AR マーカについて議論を行うことである。2 では、レスポンスアナライザに採用したランダムドットマーカについて記述する。このマーカは隠蔽にロバストであり、マーカに対する遮蔽が考えられる教室で使用することに適している。また、背景の色を認識することによって環境に依存しない安定的なマーカ認識を実現した。3 では、AR マーカを掲げるという動作は思考、筆記などの学習活動を阻害するのではないかと考え、机に置いたまま回答を行う卓上立体方式レスポンスアナライザシステムを提案した。また、マーカを掲げて回答を行う手持ちシート方式との比較実験において、卓上立体方式のほうがより手軽に回答が行えることを示した。4 では、教室で用いるための準備として、ドットの半径などのパラメータを変化させた際の認識距離について議論した。5 では、限られたマーカ面積で認識距離を伸ばすためのドット認識手法を提案を行った。

## 第2章 レスポンスアナライザにおける ランダムドットマーカの導入

この章では、隠蔽にロバストなランダムドットマーカという AR マーカについて説明する。また、レスポンスアナライザとしてランダムドットマーカを用いる際に、マーカ認識に不要なドットが増加してしまい、処理に時間がかかってしまう。この問題を赤色のマーカ背景を認識することによって解決し、環境に依存しない安定的なマーカ認識を実現した。

### 2.0.1 一般的な AR マーカ

AR マーカは、黒く四角い枠を伴うデザインが一般的である。枠の中にはそれぞれの ID 情報を識別するため黒い四角形などの図形パターンや文字が印刷される。このようなマーカデザインは、オープンソースの ARToolkit の認識システム [7] などに使用され広く普及している。このシステムのマーカ認識の仕組みは、入力画像をグレースケール化、次いで 2 値化を行い、輪郭検出により黒い枠の領域を検出し、位置・姿勢計算を行った後、ID 部分のマッチングを行う。また、ARToolkit を改良した ARTag[8] といったマーカシステムにも枠を持つマーカが使用される。しかしながら、四角く黒い枠の中というデザインに限定されてしまうことが不都合になる使用状況がある。それは、枠の一部が隠れてしまうと認識が不可能になることが大きく関係している。このことは、教室で多数のマーカを認識する際に、レスポンスアナライザとして致命的な弱点と言える。なぜなら、紙を掲げた時、手がマーカの枠に重なってしまったり、前方の人の体で隠れてしまいマーカが認識されないという場合が想定できるからである。



## 2.0.2 ランダムドットマーカとは

以上の理由より黒い枠のないマーカが広く研究されている [9]. その中で, ランダムドットマーカ [10] という AR マーカが存在する. このランダムドットマーカは内山らによって開発されたマーカの一部隠蔽に対するロバスト性と自由なマーカデザイン性を持つマーカである. 従来のマーカとの違いは四角い枠を必要としない代わりに多数のドットを持つことである. ARTag のようにマーカの枠内のビットで ID を表現するものとは違い, 事前にランダムにドットを生成して座標を登録しておき, 登録されたマーカとのマッチングを行い, マーカを判別する. 図 2.1 のように, 点への一部遮蔽があったとしても, マーカを認識している.

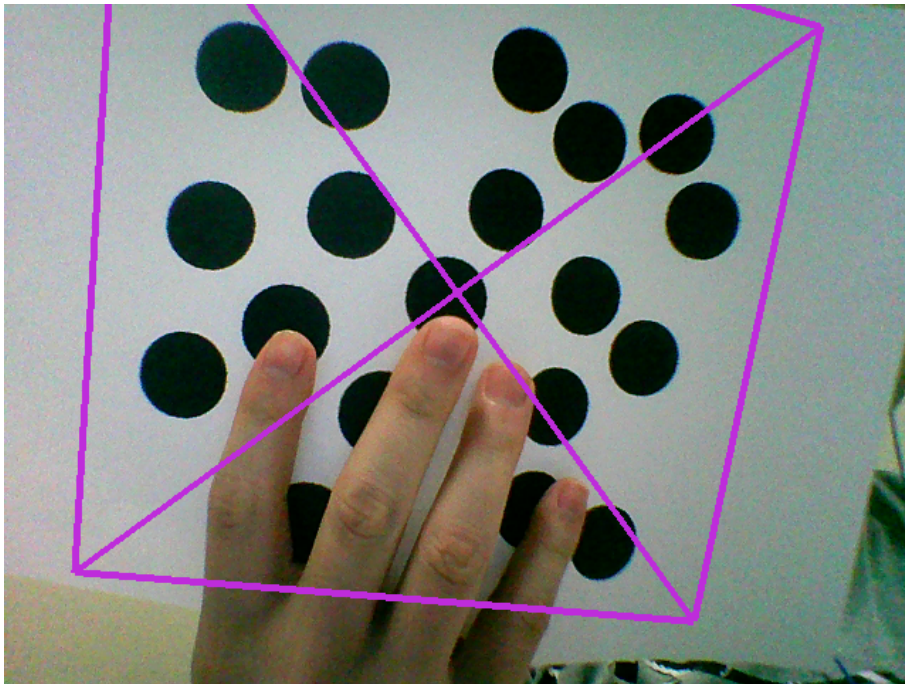


図 2.1: ランダムドットマーカ

## 2.0.3 ランダムドットマーカ認識手順

図 2.2 はランダムドットマーカの認識手順を表している. まずカメラからの入力画像の処理を行う. 入力画像をグレースケール化し, 閾値によって 2 値化処理する. 生成さ

れたバイナリ画像に対して、ラベリング処理を行う。ラベリングとは、連続している領域ごとに番号を割り振り、領域を行う手法である。ラベリングされたそれぞれの領域の重心を計算し、その座標をドット候補の座標とする。その後、トラッキングとマーカ検出により、マーカを認識する。トラッキングと検出手順では、まず LLAH[11] によって求められた特徴量を事前に登録した特徴量と照合する。その後、重畳表示のために検出されたドット群に対して射影変換を行い、一つのマーカを認識する。

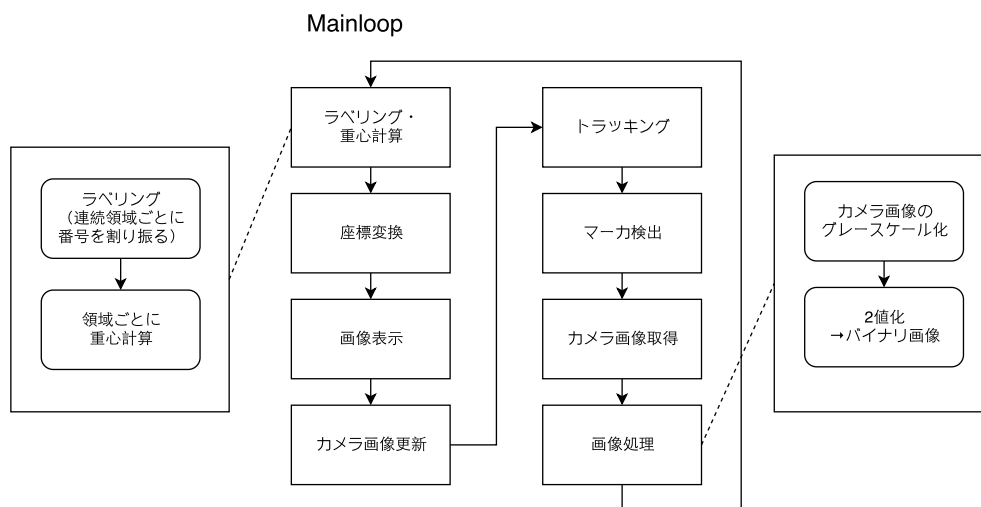


図 2.2: ランダムドットマーカ認識手順

## 2.0.4 レスポンスアナライザとしてのランダムドットマーカ

上記のトラッキング・検出の手順において、全てのドットはマーカが持つドット（図 2.3 の緑色のドット）と認識に不要なドット（図 2.3 の赤色のドット）に分類できる。

AR マーカを用いたレスポンスアナライザシステムは、前述したようにカメラを教室前方に設置して運用される。必然的に教室全体を撮影することになるので、認識すべき対象であるマーカは小さくなるとともに、不要なドットが増える。また、図 2.4 のように、不要なドットが増えれば増えるほどマーカ認識に時間がかかってしまうことがわかっている。

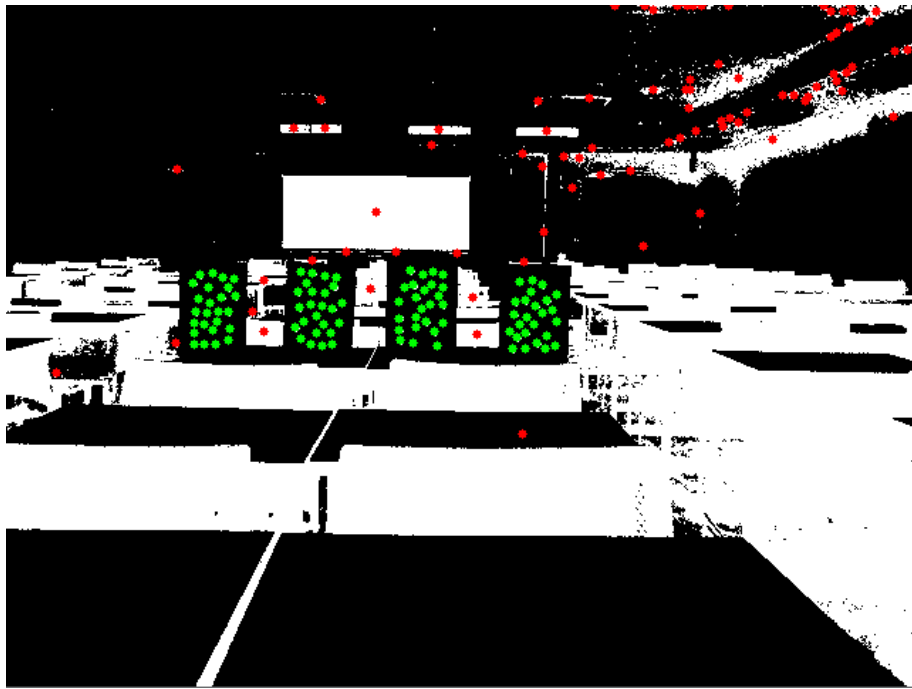


図 2.3: マーカドット (緑色) と不要ドット (赤色)

### 2.0.5 不要なドットの削除

上記のような不要なドットを除去するため、我々はマーカの背景色を変更し、その背景色を認識することでマーカ探索範囲の限定を行った。ランダムドットマーカは通常、黒いドットと白い背景を持っている。我々はドットを白色、背景を赤色に変更し、マーカ探索範囲を限定した。紙に印刷されたマーカは照明環境によっては白とびと呼ばれる現象の影響を受ける。ゆえにドットの色を白色に設定し、ドットが受ける光の影響を少なくするようにした。

背景が赤色のマーカを認識するため、以下のような手順でマーカ認識を行った。はじめに、カメラからの入力画像(図 2.5)から赤色部分を抜き出す作業を行う。まずガウシアンフィルタによる平滑化処理を行う。これはある注目画素まわりの輝度値をただ平均化するのではなく、近ければ近いほど輝度値に重みをつけ足し合わせ、注目画素の輝度値とする方法である。平滑化を行ったあと、画像の解像度を下げる。解像度を下げることでにより全体の画素数が減少するので、正確な位置はつかめない代わりに、入力画像の赤

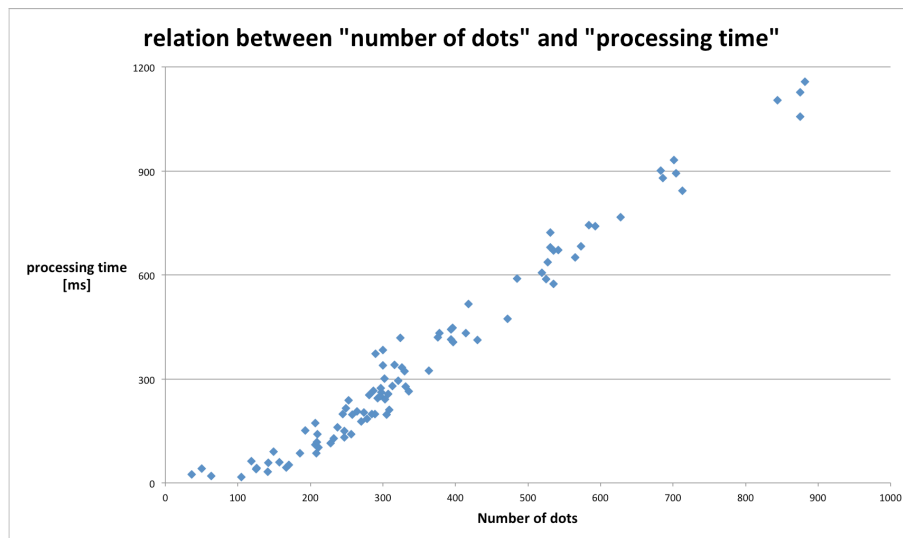


図 2.4: ドット数と処理時間の関係のグラフ

色領域のおおよその位置を素早く知ることができる。光の影響をなるべく受けないようにするため、解像度を下げた画像を HSV 色空間に変換する。HSV の色相、彩度、明度の範囲を指定し、赤色部分の座標を得る。そこから得た座標とその周り 8 画素の座標を元に、入力画像の赤色領域を得る。赤色領域の画素値はそのまま、他の領域は黒として入力画像を変換する (図 2.6)。抽出された赤色領域画像をグレースケール化し、あらかじめ設定された閾値によって 2 値化する。この手法であれば、周りの特徴点の数を減らした上でマーカの認識が可能であると考えた。

この手法が有効であることを示すため、実験を行った。従来マーカを認識する手法と赤色背景のマーカを認識する赤色抽出手法の両手法において、認識したドットの数とマーカ認識処理時間の比較を行った。不要なドット 100 個を作為的にカメラの入力画像に設置し、それぞれの手法において 5 回認識を行った。実験の結果は表 2.1 のようになった。いずれの場合においても、従来手法より赤色抽出手法の方が認識されたドット数は減少し、認識処理時間は短くなっている。また、赤色抽出手法において、認識されたドット数は 120 個～130 個で安定しており、マーカの周りの環境によらない安定的なマーカ認識を行えることを示した。

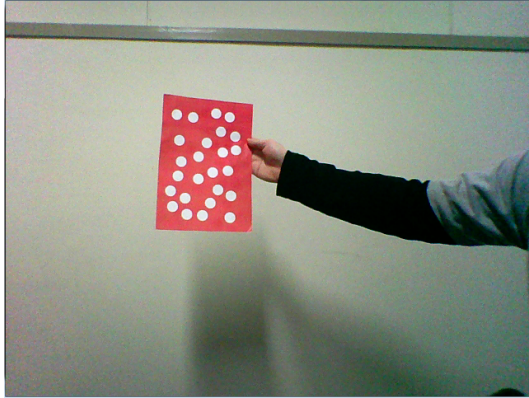


図 2.5: カメラからの入力画像

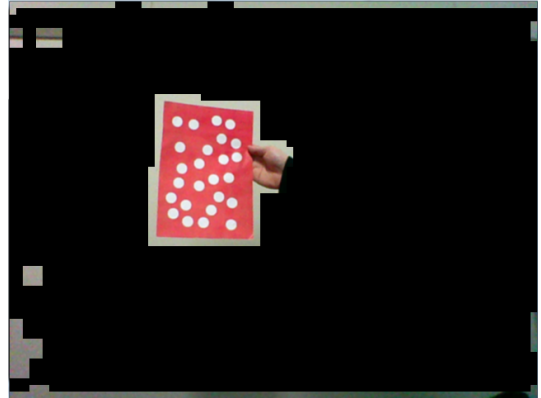


図 2.6: 赤色領域抽出画像

表 2.1: 不要ドットが多い環境での認識実験の結果

	ドット数 [個]		処理時間 [ms]	
	従来手法	赤色抽出手法	従来手法	赤色抽出手法
1 回目	288	129	188	99
2 回目	294	125	212	86
3 回目	291	126	229	196
4 回目	286	128	196	91
5 回目	292	126	309	110
平均	290.2	126.8	226.8	98.2

## 第3章 卓上立体方式レスポンスアナライザ の提案と評価

授業において、より手軽にレスポンスアナライザシステムによる解答を行うため、自立するマーカを用いた卓上立体方式レスポンスアナライザシステムの提案を行った。また、提案した方式で解答を行ってもらい、アンケートによる評価実験を行った。

### 3.1 概要

図 3.1 は背景に色をつけた卓上立体方式レスポンスアナライザシステムに用いられる立体マーカを示している。このマーカの特徴は回答するために必要なマーカが自立することであり、各面にはそれぞれ選択肢を表す小さな数字が書かれている。生徒はこのマーカを机に置き、選択問題に対して回転という少しの動きで匿名性を確保しつつ回答することができる。

ランダムドットマーカの認識は、マーカが持つドットの中心のパターンを認識することで行われる。卓上立体方式に用いられるマーカの認識は、このランダムドットマーカの認識手法と色領域の抽出を組み合わせで行われる。まず、カメラからの入力画像を HSV 色空間に変換し、赤色領域を抽出する。この手順を踏むことにより、マーカ認識を阻害する不必要なドットを取り除くことができる。次に、赤色のマーカ領域の 2 値化を行い、ドットの中心を決定する。最後に、そのパターンと事前に登録しておいたパターンを照合することで、個々の識別 ID を特定する。

### 3.2 評価実験

卓上立体方式レスポンスアナライザを評価するために、手持ちシート方式レスポンスアナライザとの比較を行った。それぞれの方式を用いて、被験者に直感的に答えられる

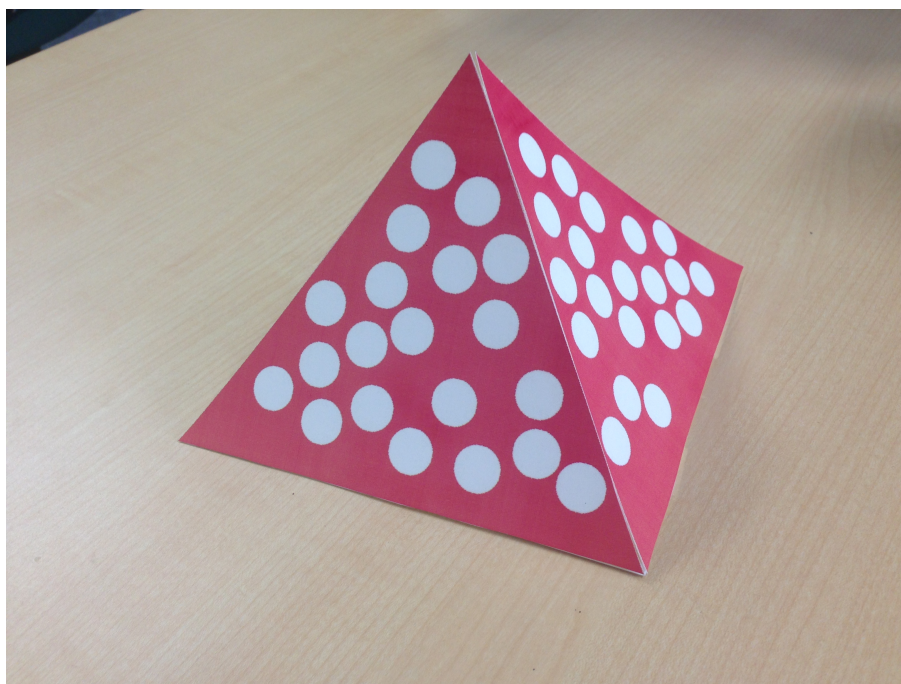


図 3.1: 卓上立体方式レスポンスアナライザ

ような簡単な問題に回答してもらった。その後、被験者にアンケートに答えてもらい、それぞれの方式間で有意差があるかどうかを検証した。

### 3.2.1 実験環境

被験者は九州工業大学の学生 16 名である。マーカ認識距離に限界があるため、被験者 16 名を 4 名ずつの 4 グループに分け実験を行った。場所は九州工業大学の 3 つの教室であり、それぞれの教室で外からの光を遮断した。

卓上立体方式レスポンスアナライザは、3.1 で述べたように赤色の背景を持った立体である。今回実験に用いた形状は正四角錐であり、側面 4 つに異なるマーカが印刷されている。側面の正三角形の一辺の長さは 20.0cm である。手持ちシート方式に用いた AR マーカシートは A4 用紙に印刷した。卓上立体方式と同じ条件にするため、その AR マーカ部分は卓上立体方式と同じ面積の正三角形である。

マーカを認識するために用いたカメラは Microsoft LifeCam Studio で、カメラの解像度



は 640×480 である。マーカが認識できているかどうか被験者に知らせるため、カメラの映像をスクリーンに投影した。

### 3.2.2 実験の流れ

1. 1つのレスポンスアナライザの回答方法を被験者に説明する。
2. 被験者に問題を提示し、レスポンスアナライザを用いて回答を行ってもらう。問題は1問ずつ提示し、計5問出題する。自分のマーカが認識されていない場合、マーカの位置や角度を適宜変更してもらった。
3. 使ったレスポンスアナライザについて、アンケートに答えてもらう。

上記の流れで、1つの方式について実験を行い、続けてもう一方の方式の実験を行った。4グループあるため、実験を行う方式の順番は交互に変更した。図3.2、図3.3は実際の実験の様子を示している。



図 3.2: 手持ちシート方式の実験の様子



図 3.3: 卓上立体方式の実験の様子

### 3.2.3 アンケート項目

- 回答は手軽であったか
- 回答のための操作はわかりやすかったか



- 問題について思考しやすかったか
- 授業で使ってみたいと感じたか
- 実際の授業で使ってみたい, 使ってみたくないと思った理由はなにか (自由記述)
- その他 (自由記述)

被験者には上記の自由記述以外の項目について, 5段階で評価を行ってもらった。

### 3.2.4 実験結果の分析

アンケートの結果は図 3.4, 図 3.5 のようになった。回答の結果に有意差があるかどうか判定するため, 各アンケート項目に対してマン・ホイットニーの U 検定を行った。有意水準 5%における U 検定の結果, 「回答は手軽であったか」について有意差があった ( $U = 76.0, p < 0.05$ )。また, この項目において平均的に評価が高いのは卓上立体方式であり, 卓上立体方式は手持ちシート方式より回答が手軽であったと結論づけられる。各アンケート項目におけるマン・ホイットニーの U 検定の結果は, 表 3.1 に示す。

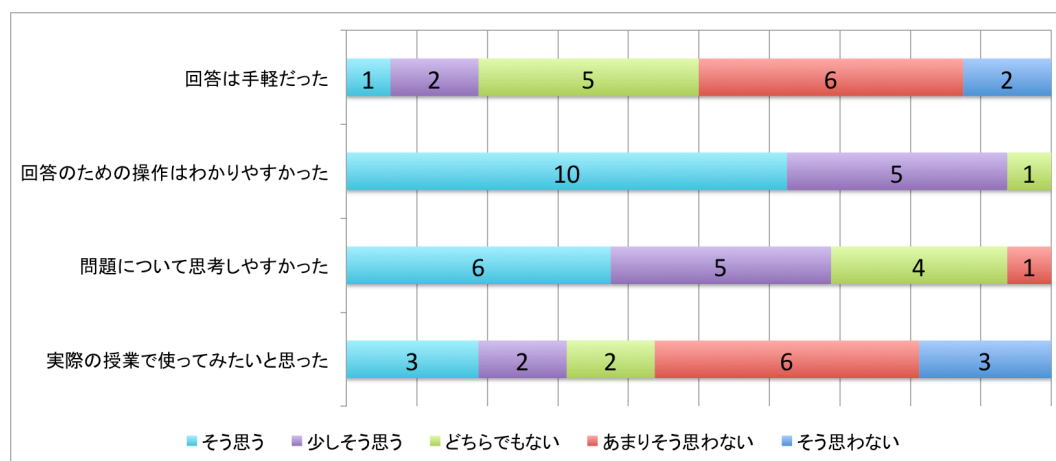


図 3.4: 手持ちシート方式のアンケート集計結果

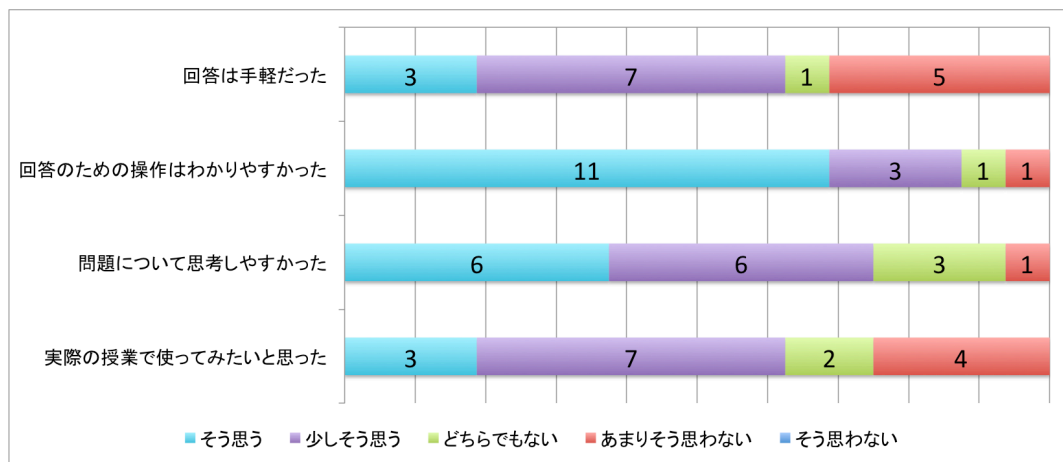


図 3.5: 卓上立体方式のアンケート集計結果

表 3.1: 各アンケート項目における U 検定のマン・ホイットニーの U 検定の結果

アンケート項目	検定統計量 U	分散	検定統計量 Z	有意確率
回答は手軽であったか	76.0	654.19	2.033	0.0420
回答のための操作はわかりやすかったか	124.0	494.32	0.180	0.8572
問題について思考しやすかったか	123.5	631.35	0.179	0.8579
実際の授業で使ってみてみたいと思ったか	84.5	660.90	1.692	0.0906

### 3.2.5 自由記述の分析

アンケートでは実際の授業で使ってみてみたい、または使ってみたくない理由について被験者に自由記述を求めた。

手持ちシート方式を実際の授業で使ってみてみたいと思った被験者は、「授業中に他のことをしなくなるから」、「体を動かさないので寝られないから」などと回答した。反対に手持ちシート方式を使ってみたくないと思った被験者は、「手で持っているため疲れるから」、「紙を上げる角度によっては肩が痛くなるから」、「認識するまでに少し時間がかかるから」などと回答した。

卓上立体方式を実際の授業で使ってみてみたいと思った被験者は、「授業への参加意欲が増

すと思ったから」、「他の人に回答を見られにくいから」という意見や、「直感で答える問題以外なら卓上立体方式の方が問題について考えられると思う」というような手持ちシート方式と比較した意見もあった。反対に卓上立体方式を使ってみたくないと考えた被験者は、「うまく認識してくれなかったから」、「認識されない時、卓上立体方式レスポンスアナライザを持って操作してしまうため、置く利点がないと感じたから」など、認識に何が合ったことについて言及していた。

その他の全体的な意見は、卓上立体方式レスポンスアナライザに対して、「直感的に答える問題の回答には向かないと思う」、「自分が回答している番号がわからない時がある」などがあつた。また、両方式に関して、「マーカの認識率を上げた方がいい」、「すぐマーカが認識できれば使ってみよう」という意見があつた。

### 3.2.6 結果と考察

手持ちシート方式より卓上立体方式の方が回答が手軽であることに有意差が現れたのは、紙を掲げるという動作が生徒の負担になっているからであると考えられる。特にマーカが認識しない場合において、手持ちシート方式では被験者はマーカを空間的に動かして解決しなければならないが、卓上立体方式ではマーカの位置を少しずらしたり、角度を変えるためマーカの片側を少し持ち上げたりすることで解決できることが大きな要因ではないかと考える。しかし、紙を掲げるという動作は生徒が授業中に寝ることを妨げるため、どちらの方式がより能動的な授業を提供できるかは、今後確認しなければならない。

また、我々は以下の2つのことを検討しなければならない。1つ目は、マーカの形状についてである。自由記述にあつた通り、両方式においてマーカの認識が行われなかったことがあつた。卓上立体方式レスポンスアナライザが認識されない原因は、形状が正四角錐であるためカメラから見て前方にある面だけでなく両隣の面がカメラに映ることがあつたからであると考えられる。2つ目は、卓上立体方式を使う場面の想定である。今回、実験で出題した問題は直感的に答えることができるような簡単な問題であつた。しかし、計算問題やゲーム形式の問題など少し被験者に考えさせる問題と比較すると、アンケートの「問題について思考しやすかつたか」という項目で有意差が表れるのではないかと考える。

## 第4章 認識距離についての考察

教室で用いるための準備として、ランダムドットマーカの認識距離の確認を行った。また、ドットの大きさ、マーカの角度といったパラメータを変化させ、必要な認識距離などの条件について考察を行った。

### 4.1 認識距離の検証

ランダムドットマーカのパラメータ変化による認識距離への影響を検証するため、3種類のマーカでシミュレーションを行った。ランダムドットマーカが遠ざかっていく動画を用意し、そのマーカを認識することで仮想的に認識距離の計測を行った。また、卓上立体方式レスポンスアナライザに用いられるマーカはカメラに対して角度がある。実際、前節の評価実験では図4.1の下段の様に、カメラとマーカに角度があった。したがって、以下の2つの場合について、それぞれカメラからの距離を29.14cmから550.0cmまでマーカを遠ざけるシミュレーションを行った。

1. マーカがカメラに正対している場合
2. マーカがカメラに角度がある場合

#### 4.1.1 マーカパラメータについて

表4.1のように、3種類のパラメータを持ったマーカを用意した。それぞれのパラメータにおいて、200のランダムドットマーカを生成し、それぞれ1つのマーカを実験で使用した。パラメータ1のマーカは、[12]の実験に用いたマーカと同一のものである。パラメータ2とパラメータ3は、パラメータ1を基準とし、三角形の枠内に収まるように、ドット半径とドットの数を変化させた。それぞれのパラメータにおけるドット間距離の割合は一定に保っている。

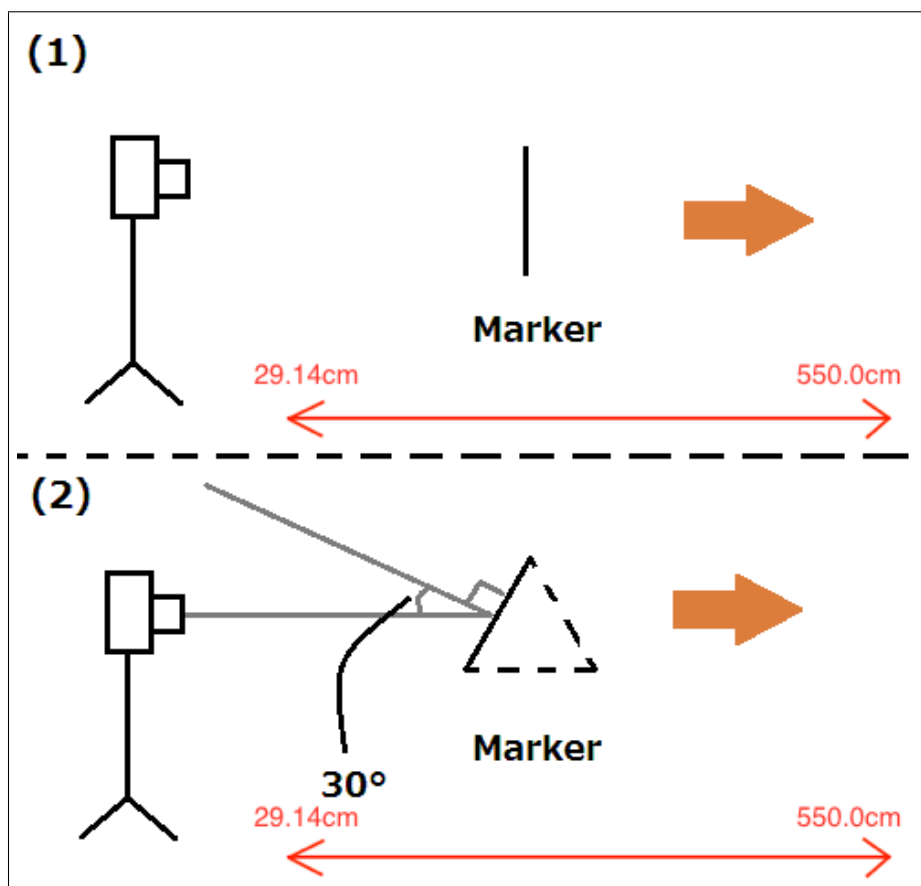


図 4.1: マーカとカメラが正対している場合（上段）とカメラの向きとマーカの法線のなす角度が  $30^\circ$  の場合（下段）

#### 4.1.2 実験環境

まず、背景が赤色の三角形のマーカが遠ざかっていく動画を作成する。動画サイズは  $640 \times 480$  に設定した。また、マーカとカメラに角度がある場合は、カメラの向きとマーカの法線のなす角度が  $30^\circ$  に設定し、動画を作成した（パラメータ 1', パラメータ 2', パラメータ 3'）。これは、卓上立体方式レスポンスアナライザを真横から見たときの角度である。なお、それぞれのドット半径と数は同一である。計 6 つの動画に対して、フレーム毎に、認識したドットの数と認識したマーカの ID を記録した。

表 4.1: 各マーカのパラメータ設定

マーカ	ドット半径 [cm]	マーカのドット数
パラメータ 1	0.936	20
パラメータ 2	1.217	10
パラメータ 3	0.735	30

### 4.1.3 実験結果 (マーカがカメラに正対している場合)

図 4.2 は、マーカがカメラに正対している場合の実験結果である。この図において、濃い色で描かれた範囲が正しくマーカが認識された範囲である。黄色が基準であるパラメータ 1、青色がパラメータ 2、緑色がパラメータ 3 の結果である。

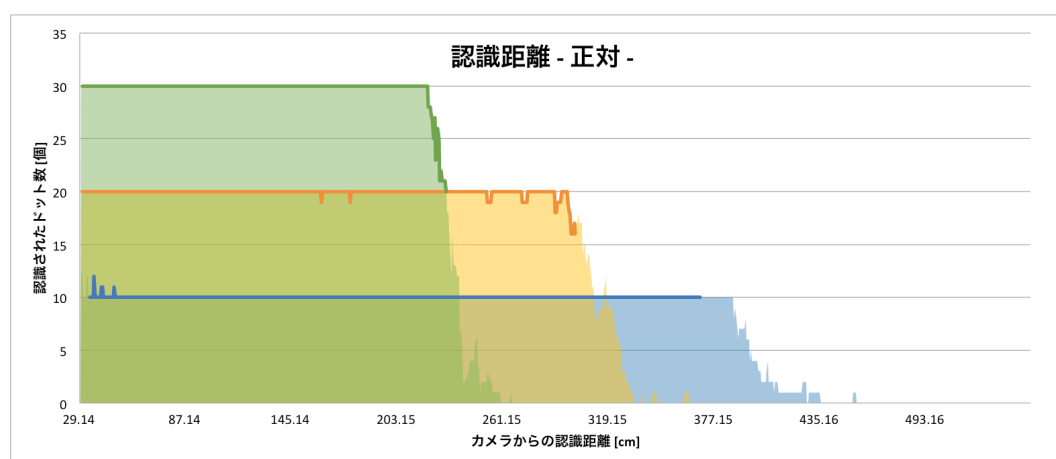


図 4.2: マーカとカメラが正対している場合の結果

表 4.2 に、各パラメータにおける最大認識距離と最低ドット数を示した。ここで、最大認識距離は、一辺 20cm の三角形である卓上立体方式マーカを想定し、カメラから認識できるのおおよその最大距離を算出した。また、最低認識ドット数は正しくマーカを認識したフレームの中で、最低のドットの数のことである。

最大認識距離が最も長いのは、パラメータ 2 である。これはドットの大きさが最も大きいことから、より遠くにあるドットもカメラが認識できるためであると考えられる。しかし、パラメータ 2 において最低認識ドット数がマーカのドット数と同じである。これ

は隠蔽に対するロバスト性が失われていると考えられる。

表 4.2: 各パラメータにおける実験結果 (正対)

マーカ	最大認識距離 [cm]	最低認識ドット数 / マーカのドット数
パラメータ 1	300.6	16 / 20
パラメータ 2	369.0	10 / 10
パラメータ 3	229.8	20 / 30

#### 4.1.4 実験結果 (マーカとカメラに角度がある場合)

図 4.3, 表 4.3 はカメラの向きとマーカの法線のなす角度が  $30^\circ$  場合の実験結果である。図 4.3 において、濃い色で描かれた範囲が正しくマーカが認識された範囲である。黄色が基準であるパラメータ 1', 青色がパラメータ 2', 緑色がパラメータ 3' の結果である。表 4.2 と比較すると、どのパラメータにおいても、カメラの向きとマーカの法線のなす角度が  $30^\circ$  の場合の方が、最大認識距離が短い。したがって、マーカとカメラが正対している状況の方が、マーカの認識精度が改善されると考えられる。

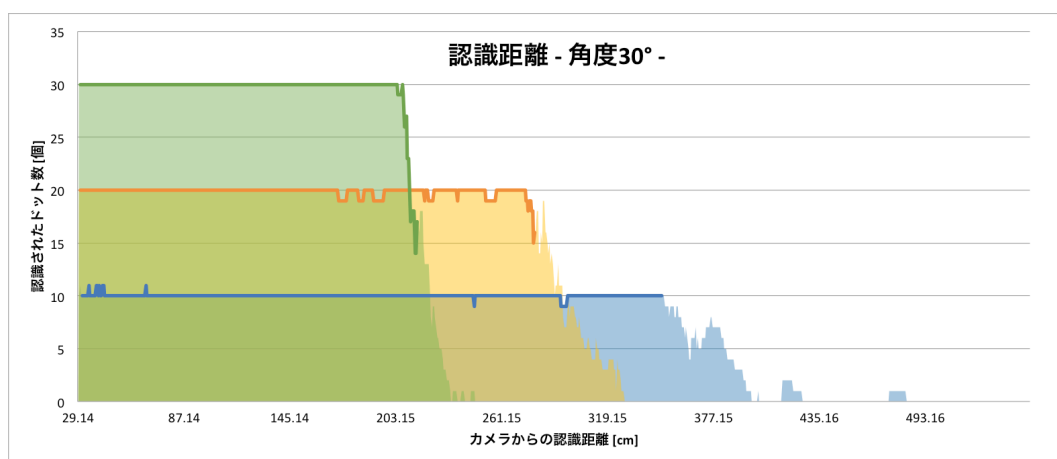


図 4.3: カメラの向きとマーカの法線のなす角度が  $30^\circ$  の場合の結果

表 4.3: 各パラメータにおける実験結果 (30°)

マーカ	最大認識距離 [cm]	最低認識ドット数 / マーカのドット数
パラメータ 1'	279.1	15 / 20
パラメータ 2'	348.7	9 / 10
パラメータ 3'	214.7	14 / 30

#### 4.1.5 考察

実験結果より、ドットの半径は大きければ大きい方が、より遠くのマーカが認識され、さらに隠蔽にロバストになる。しかし、それらのパラメータを大きくすると、それだけ卓上立体方式レスポンスアナライザは大きくなり、生徒の筆記等を阻害することになる。

ドット間距離が短すぎる場合、ドット同士が繋がり、マーカの認識に失敗する一因になりうる。しかし今回の実験では、図 4.4 のようにドットが繋がって一つのドットとして認識されることはなかった。よって、単純にドットが小さくなり、認識ができなくなったと考えられる。図 4.4 の例では、パラメータ 3 において距離およそ 250cm で、赤い丸で囲まれた領域 1 つだけをドットと認識しており、全ての白い領域の数はマーカのドット数と等しい 30 である。

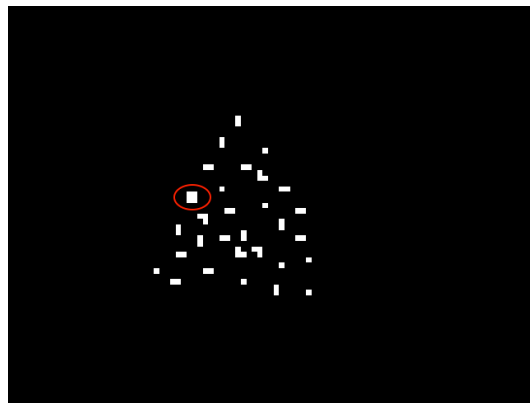


図 4.4: パラメータ 3・距離 250cm の拡大図

また、現在用いられているパラメータ 1 の卓上立体方式マーカについて、最大認識距



離は表 4.2 より、およそ 300cm である。これは実際の九州工業大学の教室において、座席の 3 列目のマーカまで認識できる距離である。図 3.3 を参考に、前列、後列にも 4 人の生徒がいると想定すると、1 台のカメラに合計 12 名分のマーカを認識できる。このことから、50 名の学習者を想定すると、カメラはおよそ 5 台必要になると予想される。しかし、卓上立体方式マーカが前方の生徒によって、隠蔽へのロバスト性が補いきれないほど隠れてしまう可能性が考えられる。よって、カメラの位置は柔軟に変更する必要がある。例えば、教室前方にカメラを設置するのではなく教室横に設置し、必要以上のマーカへの隠蔽を避けるという方法が考えられる。

## 4.2 必要な認識距離について

図 4.5 は、実験の結果より、最大認識距離とドット半径の大きさの関係でのグラフである。また、一般的な教室の大きさは、8m 四方ほどである。グラフより、8m 先のマーカを認識できるドット半径は 2.75cm ほどである。この半径はマーカ面積に対し大きい数字であり、ロバスト性を保ちつつマーカ認識を行うことは難しい。

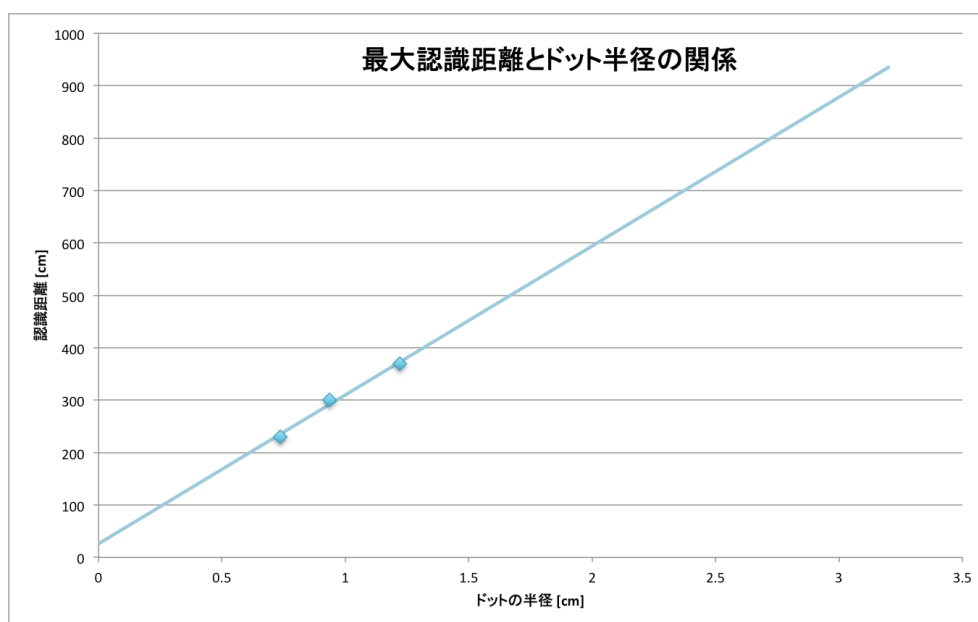


図 4.5: 最大認識距離とドット半径の関係

### 4.3 考察とまとめ

ランダムドットマーカのパラメータ変化が認識距離に影響を与えるか確認するため、実験を行った。ランダムドットマーカは自由にドット半径や数といったパラメータを変更できる AR マーカであり、3 種類のパラメータを持ったマーカに対し、認識シミュレーションを行った。それによって、ドットの半径を大きくすると最大認識距離が伸びるが、その分ドット数が減るため、隠蔽に対するロバスト性が失われるという結果を得た。また、必要な認識距離を実現するために、大きなドット群を限られたマーカ面積に収めることは難しいことがわかった。

## 第5章 マーカ外に中心があるドットの認識

マーカ面積が限られている中で、認識距離を伸ばすことは難しい。そこで、従来のランダムドットマーカのドット認識に用いるパラメータを重心から中心座標に変更した。中心座標は、輪郭の座標から直線成分の座標を除外したものから計算される。したがって、ドットの一部がマーカ外に出ている、ランダムドットマーカの一部のドットとして機能すると考えた。このマーカ認識手法によるマーカの識別能力、認識距離について評価し、考察を行った。

### 5.1 概要

前章までの研究より、卓上立体方式レスポンスアナライザに用いるためのマーカシステムは、認識距離を伸ばす必要がある。また、以下のようなことを行うと、マーカ認識距離が伸びると考えられる。

- 一つ一つのドットを大きくする
- 卓上立体方式の立体マーカのマーカ面積を大きくする

ドットを大きくすることは、カメラの入力画像に対するドットの面積が大きくなるため、マーカ認識距離は伸びると予想される。しかし、卓上立体方式の立体マーカの面積は限られているため、ドットを大きくするとマーカ内に描けるドットの数も少なくなる。ランダムドットマーカのマーカの数も減らしすぎると、特徴である隠蔽に対する頑強性が失われること、あるいはマーカとしての機能を失うことも考えられる。また、卓上立体方式の立体マーカを大きくすることは、ドットを大きくすることに繋がる。しかし、学習者にとって立体マーカが大きくなることは、机の上のマーカの占有率が大きくなるため、学習システムとしては好ましくない。

そこで、私はマーカ外にあるドットをランダムドットマーカの一部として利用する手法を考えた。ランダムドットマーカの認識は、まず2値化画像の連続領域の重心の座標を取得し、その座標間の距離が特徴量として用いられる。つまり、マーカの外にある点であっても、事前に座標を登録することができれば、ランダムドットマーカの認識に利用することができる。例えば、マーカ内に半円を描き、その半円の中心がマーカ外にある場合でも、その中心座標を計算する。このような認識を行うことによって、同じ面積でもドットを大きくしつつ、ドットの数を保つことができる。結果として、認識距離が伸びることになると考えた。

そこで、ランダムドットマーカの認識手法の改善を行った。従来のランダムドットマーカの事前に登録されるドットの中心座標は、そのドットの重心の座標と等しい。しかし、重心の座標を利用すると、座標情報はマーカ内に留まってしまふ。そこで我々は輪郭の座標情報から円の中心を計算する手法に変更し、図 5.1 のようなマーカ外にドットを含むマーカの認識を行った。たとえ、円の一部が見えなくとも中心座標が計算できると考えたからである。

全てのドットの中心座標は、直線成分を除いた輪郭座標から最小二乗法で求めた。また、中心座標の計算精度を相対誤差から評価するための予備実験を行った。その後、マーカ外に中心のあるドットを含むマーカにおいて、識別が行えるかの実験を行い、考察した。

## 5.2 ドットの中心座標の計算

前述の通り、従来のランダムドットマーカのドットの認識には、バイナリ画像における白色領域の重心が用いられていた。しかし、重心とはカメラが認識している領域の内側に留まり、マーカ外の座標の計算には用いることができない。よって、輪郭の座標から中心を計算する手法を提案する。中心座標の計算について以下に示す。バイナリ画像から、ラベリングを行わず、白色領域の輪郭を検出する。輪郭の検出には、OpenCV の `cvFindContours` という関数を用いた。この関数を利用することによって、白色領域ごとに輪郭を構成している全ての座標を取得することができる。

次に直線成分の座標の除外を行うため、直線を構成している座標を検出する。まず、輪郭座標の中から等間隔に座標を抽出する。その中から一つの座標を選び、その両隣の座標との成す角度を計算する。その角度が閾値より小さい時に、その連続する3点は直線

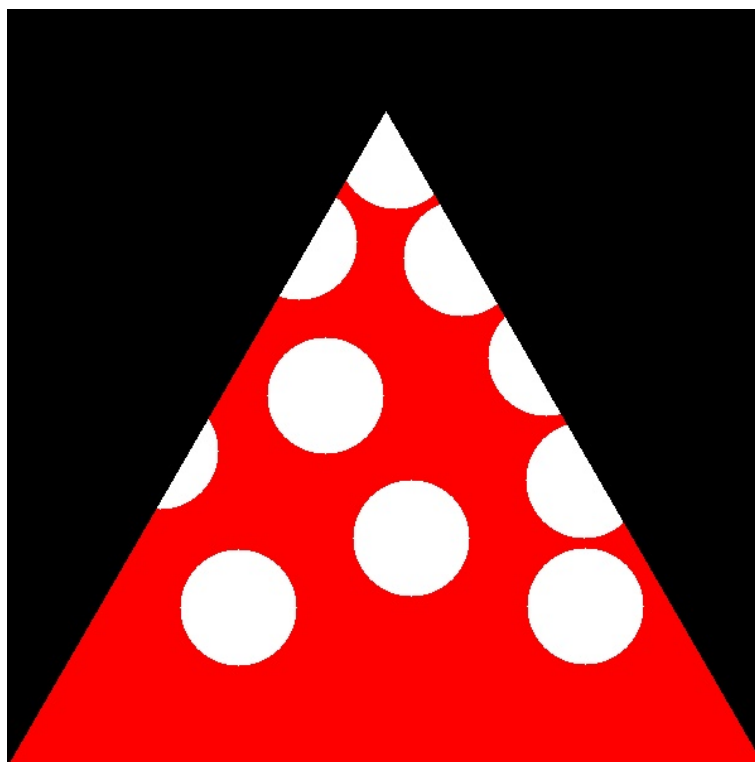


図 5.1: マーカ外に中心があるドットを含むマーカ

の一部であることがわかる。そして、その閾値を超えない座標の範囲から、直線の始点と終点を検出する。

最後に抽出された曲線成分の座標から中心座標を最小二乗法により計算し、システムは白色領域の中心座標として認識する。以上の処理を領域ごとに繰り返す、それぞれのドットの中心座標を求めていく。

### 5.3 予備実験

マーカにあるドット中心の計算精度の確認を行うため、予備実験を行った。

### 5.3.1 概要

この予備実験の目的は、マーカ外にあるドット中心をどれだけ正確に計算できているかの確認を行うことである。まず、図 5.2 のような画像を用意した。上段の左から順にドット ID:1 から 5、次の段の左から順に ID:6 から 10 という順番で、20 個のドットの一部を用意した。ドットの見えている部分を表現するために、輪郭座標を利用することから、弧の長さでそれぞれを表現する。例えば、ドット ID:1 は半円であるため、弧の長さは 50% である。また、一番短い弧の長さを持つドット ID:20 は 31.4% と表現される。この入力画像に対して、中心を計算し、測定値を求めた。それを理論値と比較し、x 座標、y 座標の相対誤差を用いて、精度の評価を行った。画像の解像度は  $640 \times 480$  で作成した。

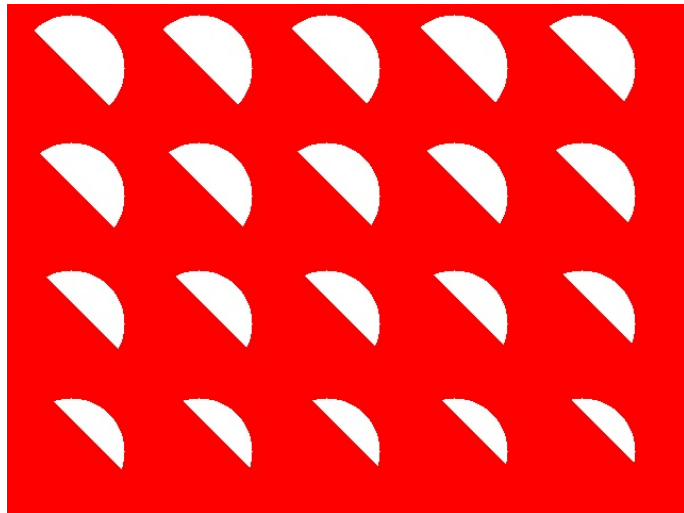


図 5.2: 真円に対して半分以上の輪郭が失われたドット

### 5.3.2 実験結果

図 5.3 の赤い点が計算された中心座標である。また、図 5.4 は x 座標、y 座標の相対誤差の絶対値を足し合わせたグラフである。このグラフから、弧の長さが小さくなると共に計算精度は落ちていっていることがわかる。また、このグラフのマーカ ID:15 までの x 座標、y 座標の相対誤差の絶対値を足し合わせた値は 0.3253 を下回っている。この中心座標の相対誤差 0.3253 のドットを含むマーカの認識には成功したため、この相対誤差

を正しいドット中心の精度の閾値として設定する。よって、マーカ ID:1 から 15 までのドット中心の計算は、マーカ認識が行える程度の精度を持っていることになる。マーカ ID:15 の弧の長さは真円に対して 37.0%なので、弧の長さは 37.0%以上がマーカ内に描かれている必要があるということがわかった。また、その範囲ならばランダムドットマーカのドットの一部分として有効であることがわかった。

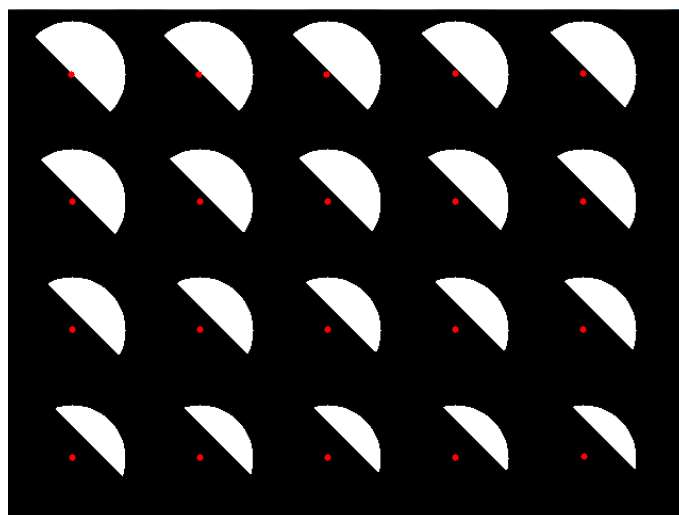


図 5.3: 中心座標の計算結果

## 5.4 マーカ外に中心を持つドットを含むマーカの認識

5.3 より、ドットを正確に認識するために描かれていなければならないドットの弧の長さは求まった。その条件を満たす図 5.1 のようなマーカを 200 種類生成し、それらのマーカを認識できるかどうかの実験を行った。

### 5.4.1 概要

本実験の目的は、マーカ外に中心があるドットを含むマーカを認識できるかどうかの確認することである。5.3 より、ドットは弧の長さで 37%以上、マーカ内に描かれていなくてはならない。その条件を満たす 200 種類のランダムドットマーカを生成した。ドットの大きさはマーカを 200 種類生成できる中で最大の大きさに設定した。そして、生成

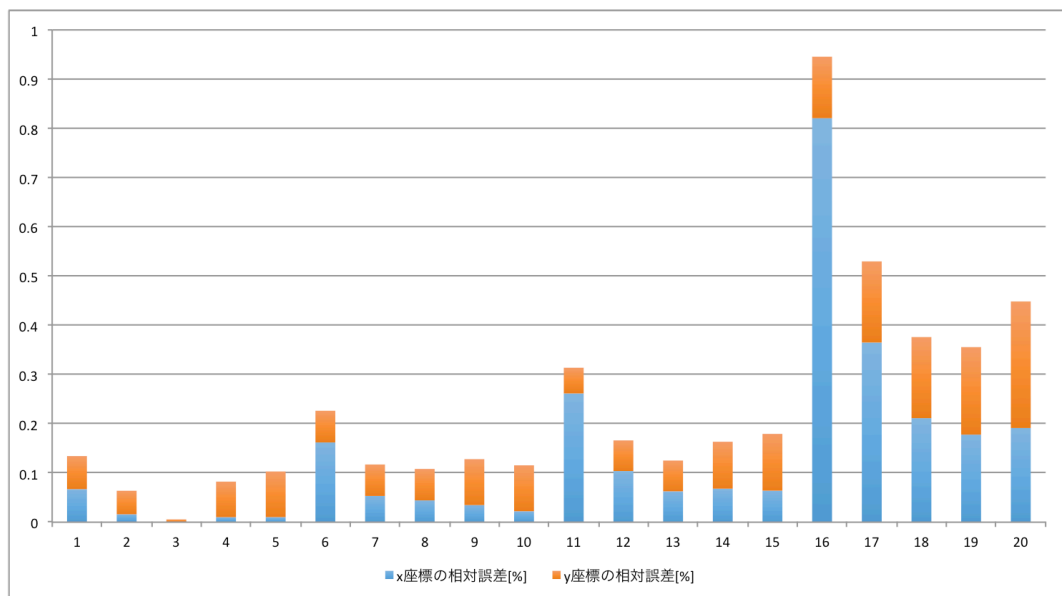


図 5.4: x 座標, y 座標の相対誤差の絶対値を足し合わせたグラフ

された一つ一つのマークを入力画像として、照明条件などを無視した理想環境下においてマークを認識できるかを実験した。

### 5.4.2 実験結果

マーク外に中心があるドットを含むマーク 200 種類の内、198 のマークを識別できた。また、認識が行われたマークの内、違う ID を示しているマークはなかった。

### 5.4.3 認識できたマークと認識できなかったマークの違い

図 5.5, 図 5.6 は正しく認識が行われたマークの一つである。また、図 5.7 は x 座標, y 座標の相対誤差の絶対値を足し合わせたグラフである。このグラフから、全てのドットが 5.3 で設定した閾値を下回っていることがわかる。したがって、どのドットにおいても正しくマーク認識が行える精度で中心の計算が行われていると言える。

図 5.8, 図 5.9 は認識されなかったマークの一つである。これらの画像からわかるように、一番上のドットが狐の長さ 37% を下回っていた。また、図 5.10 からは、そのドット



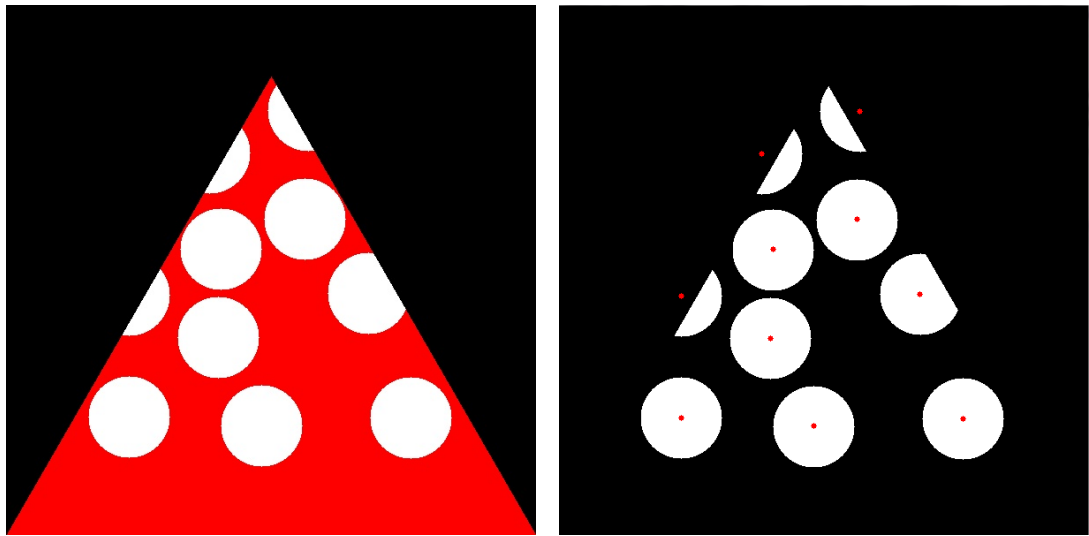


図 5.5: 正しく認識されたマーカ

図 5.6: 正しく認識されたマーカの中心座標

の相対誤差が突出しており，それ以外のドットの相対誤差は比較的低いことがわかる。

#### 5.4.4 考察

5.4.3 で述べた認識できなかった2種類のマーカのうち，一つを紹介したが，もう一つの認識できなかったマーカも頂上の部分に孤の長さ37%以下のドットを持っており，グラフも図5.10のようになった。これらのようなマーカを認識するためには，1) マーカ生成の際の条件設定の見直し，2) 最小二乗法によるドット認識手法の変更，のいずれかを行う必要がある。2) は孤の長さ37%以下のドットの認識を行うことができるようにすることと等しい。それに成功すると，ドットの大きさをより大きくできるため，認識距離の拡大に繋がると考える。

また，認識に成功した図5.5のマーカの認識距離は，図4.5のグラフより，450cmほどである。同じ10個のドットの数の場合において，従来手法の認識距離は369.0cmである。よって，ドット中心を計算するドット認識手法は理論的に認識距離の拡大に貢献したと言える。

また，今回のドット認識手法の提案により，図5.11のように，さらに認識距離の拡大が見込めるマーカ認識を行えるようになった。この例では，3つの青色の円の一部分と白色

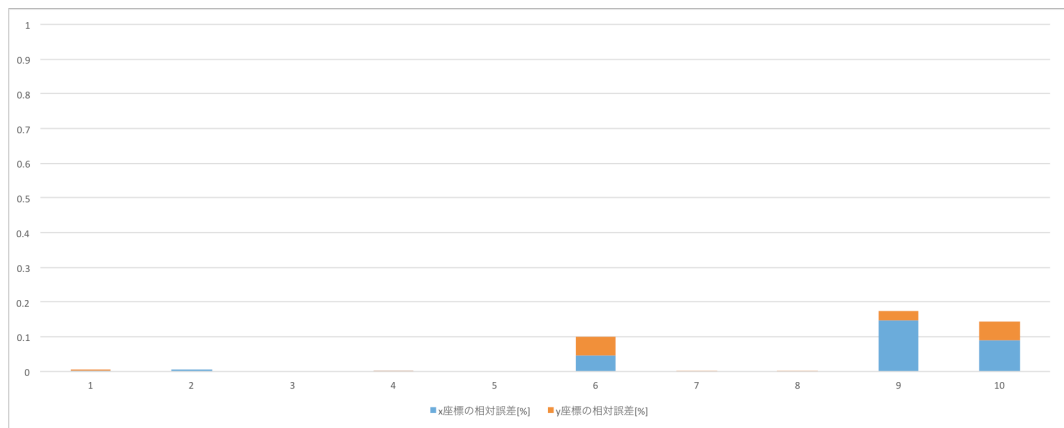


図 5.7: 正しく人先されたマーカの x 座標, y 座標の相対誤差のグラフ

のドット 7 つが描かれている。色の違うドットは重なり合いが許されるため、図 5.11 の白色のドットの大きさは、図 5.5 の場合よりも大きく設定できる。このマーカの認識距離は図 4.5 のグラフより、530cm ほどと予想される。

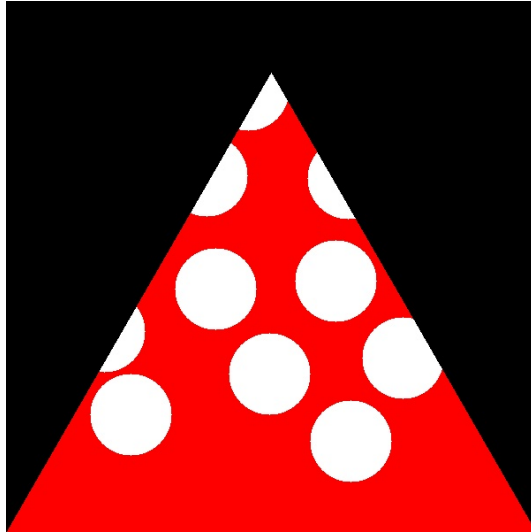


図 5.8: 認識されなかったマーカ

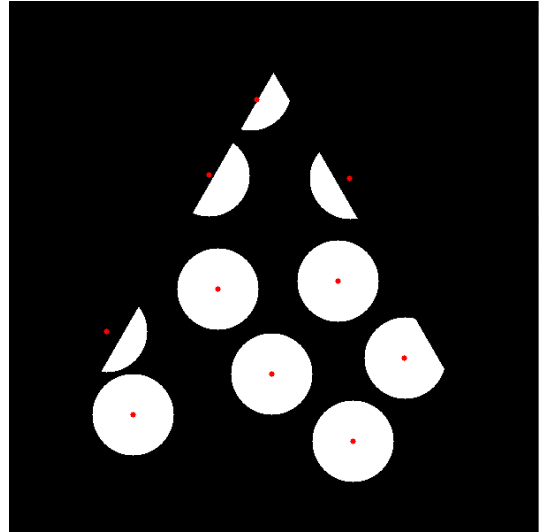


図 5.9: 認識されなかったマーカの中心座標

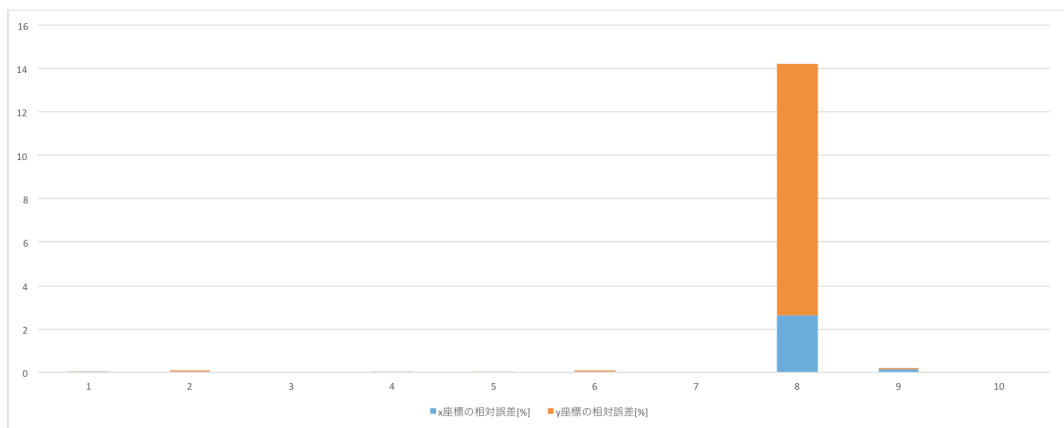


図 5.10: 認識されなかったマーカの x 座標, y 座標の相対誤差のグラフ

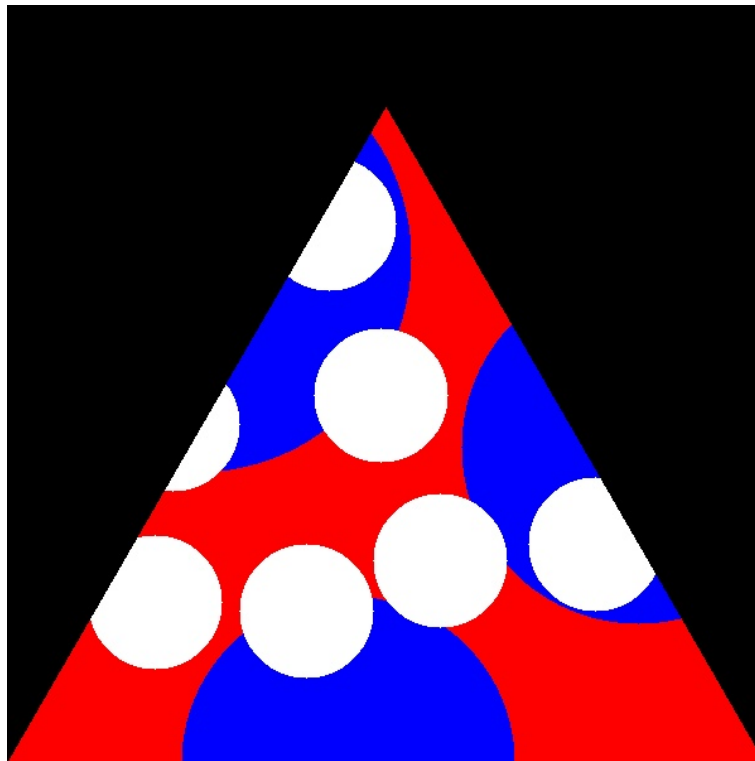


図 5.11: さらに認識距離を伸ばすためのマーク案

## 第6章 結論

本論文では、紙とカメラで実現できる簡易レスポンスアナライザに適した AR マーカを追求した。レスポンスアナライザシステムは活発な双方向授業を行うことができる回答収集システムとして知られている。そのシステムではクリッカーなど電子デバイスが用いられることが多いが、カメラと AR マーカを使用して実現する簡易レスポンスアナライザシステムに注目した。カメラベースのこのシステムはコスト、管理の面で優れている。また、解答の収集の際にマーカとカメラの間に遮蔽物があったら解答を集めることができないため、適した AR マーカとして一部の隠蔽に強いランダムドットマーカを適用した。また、ランダムドットマーカの背景を赤くし、その領域だけ認識を行うことで、環境に依存しない安定的なマーカ認識を実現した。

続いて、手でマーカを持つ手持ちシート方式に対して、卓上立体方式レスポンスアナライザシステムを提案した。机に置いて解答を行う卓上立体方式は思考などの学習活動を中断することなく解答が行えると考えた。実際に両手法を用いて問題に解答してもらい、卓上立体方式の方がより手軽に回答を行えることを示した。また、教室の奥までマーカ認識を行うための準備として、ランダムドットマーカのパラメータを変更した際の認識距離の確認を行った。

その結果を基に、限られたマーカ面積の中で認識距離を伸ばすことができるランダムドットマーカの認識手法を提案した。具体的には、輪郭座標からその円の中心を計算し、それをドットとして認識する手法である。このドット認識手法により、マーカ外に中心があるドットの認識も可能になり、理論的に認識距離を伸ばすことができた。

今後の展望はドット中心の計算方法の精度向上など、限られたマーカ面積という制約の中で、さらなる認識距離の拡大に貢献できる手法を模索することである。

## 謝辞

本論文の完成にあたり，ご指導頂いた三浦元喜准教授に心から感謝致します。また，日頃からお世話になっている情報セクションの先生方，技術的なことも相談できる仲間や後輩，支えてくれた家族に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Jane E Caldwell. Clickers in the large classroom: Current research and best-practice tips. *CBE-Life sciences education*, Vol. 6, No. 1, pp. 9–20, 2007.
- [2] 武田直仁, 田口忠緒. クリッカー (授業応答システム) を用いた双方向性授業の比較と評価: 学生中心学習の構築を目指して. *KEEPED JAPAN*. [http://www.keepad.com/jp/casestudies/docs/Comparison and Evaluation of Clickers in the Interactive Classroom.pdf](http://www.keepad.com/jp/casestudies/docs/Comparison_and_Evaluation_of_Clickers_in_the_Interactive_Classroom.pdf),(accessed 2015-12-9), 2012.
- [3] Alaba Olaoluwakotansibe Agbatogun. Developing learners' second language communicative competence through active learning: Clickers or communicative approach? *Journal of Educational Technology & Society*, Vol. 17, No. 2, 2014.
- [4] 小林建太郎, 林宏昭, 山本敏幸, 北村知昭, 中原孝洋, 小酒井正和, 合志智子, 鈴木映司, 蕨山高等学. スマートデバイスを利用した参加型授業の実践. *教育システム情報学会研究報告*, Vol. 28, No. 5, pp. 49–56, 2014.
- [5] Andrew Cross, Edward Cutrell, and William Thies. Low-cost audience polling using computer vision. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 45–54. ACM, 2012.
- [6] Motoki Miura and Toyohisa Nakada. Device-free personal response system based on fiducial markers. In *Wireless, Mobile and Ubiquitous Technology in Education (WMUTE), 2012 IEEE Seventh International Conference on*, pp. 87–91, 2012.
- [7] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Augmented Reality, 1999.(IWAR'99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on* (pp. 85-94). *IEEE*, 1999.

- [8] Mark Fiala. Artag, a fiducial marker system using digital techniques. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 2, pp. 590–596. IEEE, 2005.
- [9] Adam Herout, Istvan Szentandrási, Michal Zachariá, Markéta Dubská, and Rudolf Kajan. Five shades of grey for fast and reliable camera pose estimation. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*, pp. 1384–1390. IEEE, 2013.
- [10] Hideaki Uchiyama and Hideo Saito. Random dot markers. In *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, pp. 35–38, 2011.
- [11] Tomohiro Nakai, Koichi Kise, and Masakazu Iwamura. Use of affine invariants in locally likely arrangement hashing for camera-based document image retrieval. In *International Workshop on Document Analysis Systems*, pp. 541–552. Springer, 2006.
- [12] Manabu Ito and Motoki Miura. Handiness of device-free response analyzer systems in the classroom. *Procedia Computer Science*, Vol. 112, pp. 1829–1834, 2017.



## 発表論文リスト

- 伊藤 学歩, 三浦 元喜: AR マーカのパラメータ変化による認識距離への影響, 電子情報通信学会教育工学研究会, 北九州, 2017 年 10 月.
- Manabu Ito, Motoki Miura: Handiness of device-free response analyzer systems in classroom, Proceedings of 21th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES2017), Marceille, France, pp. 1829-1834, September 2017.
- 伊藤 学歩, 三浦 元喜: 卓上立体方式レスポンスアナライザの評価実験, 情報処理学会インタラクシオン 2017, 東京, pp. 405-408, 2017 年 3 月.
- Manabu Ito, Motoki Miura: Evaluation of Stationary Colour AR Markers for Camera-based Student Response Analyser, Proceedings of 20th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES2016), Vol. 96, York, UK, pp. 904-911, September 2016.
- 伊藤 学歩, 三浦 元喜: ランダムドットマーカを用いた置き型レスポンスアナライザの提案, 情報処理学会インタラクシオン 2016, 東京, 2016 年 3 月.
- Manabu Ito, Motoki Miura: Portable Vision-based Response Analyzer with Sheet Bending Recognition, Proceedings of GCCE 2015, Osaka, Japan, pp. 143-144, October 2015.