

錯視を利用したARマーカによる 低負荷なカメラ位置推定手法の検討

堀江 大輔¹ 勝間 亮¹

概要: 近年, ネットワーク環境の整備や高性能な小型モバイル端末の普及により, モバイル端末の位置情報を利用したサービスを行うために様々な位置推定手法の研究が行われている. 一般的な位置推定にはGPS(Global Positioning System)やWi-Fi測位システムが用いられる. これらの方法は利用者が行動することなく位置を推定できるメリットがあるが, 人が多い場所での電波を用いたモバイル端末の位置推定は電波干渉の原因にもなるため好ましくない. 一方, 利用者が能動的にAR(Augmented Reality)マーカを読み込むことで位置を確定し, ナビゲーションなどのサービスを行うことが検討されているが, 高精度でARマーカを読み込ませるためには, カメラをマーカの正面に向けて撮影する必要があり, 利便性の点で問題がある. そこで, ヘッドマウントカメラなどを装着して歩行しているだけで自動でマーカを読み込ませることができるように, 錯視を利用したARマーカを考えた. 本研究では, マーカの形状について定義し, 通常の正方形のマーカと錯視を利用したマーカを用意しそれぞれのマーカの認識可能範囲の検証を行った.

Investigation of Low Cost Camera Localization by Recognizing AR Marker Using Optical Illusion

DAISUKE HORIE¹ RYO KATSUMA¹

Abstract: In recent years, small portable terminals such as smartphones are improved and are going to spread. There are many studies for localization in order to provide services using users' locations. GPS (Global Positioning System) and Wi-Fi positioning system are sometimes used for localization. These methods can estimate users' positions without any user actions. However, the localization methods using radio waves may cause radio interference. On the other hand, it has been investigated for navigation services that users act for confirming their positions by reading AR (Augmented Reality) markers. However, in order to recognize AR markers with high accuracy, the users have to let their cameras be in front of the markers carefully. There is a problem in terms of convenience. Therefore, in order to be able to automatically recognize AR markers just by wearing the devices like head-mounted cameras, we consider a new AR marker using optical illusion. In this study, we defined the shape of the marker. We also prepared an existing square marker that is commonly used and our marker using the optical illusion and verified the recognizable range of each marker.

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及により, 様々なITサービスが家や職場にいるときだけでなく外出先や移動中などでもとても手軽に行われるようになった. 現在スマートフォンにはGPS機能が標準搭載され, SNSなどの様々なジオメディアで位置情報は利用されている. ま

た, ユビキタス化に伴い, 人や物どうしがネットワークにつながることによって, 人間がコンピュータを意識することなく高い利便性を得ることができるようになることが期待されている. それに関連してCV(コンピュータビジョン)やウェアラブル端末の研究が世界中でなされており, Apple WatchやGoogle Glassはその一例といえる. これに伴って, ウェアラブル端末を利用した自動的な位置情報取得サービスへの需要が高まっている. こうしたモバイルは小型で軽量であることが最も重要視されるため, 計算能力,

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University

バッテリー容量は乏しくなってしまう。そのため、処理が単純で低エネルギーな位置推定手法の提案が望まれる。

現在、位置情報の推定には GPS と Wi-Fi 測位システムが一般的に用いられる。GPS は衛星と通信を行い、電波を受信した時刻から衛星と受信機の距離を求め、その距離を半径とした三つの球の重なり合う部分からあらかじめわかっている衛星の位置情報をもとに受信機の位置を計算する三辺測量という方法をとっている。しかしこの方法は、障害物のない屋外においては精度が高いものの、屋内（または地下施設、山に囲まれた山間部など）では電波が受信部まで到達しなかったり、電波に誤差が生まれ正確な利用ができない。また Wi-Fi 測位システムは GPS 同様に三辺測量をもとにしており、AP（アクセスポイント）の受信する電波強度から AP 位置管理サーバによって現在位置が計算される [1]。AP の設置環境に大きく左右されるため精度が安定しない上、電波を利用しているため多人数で利用すると干渉する可能性が高くなる問題がある。従って、現在行われている位置推定サービスは屋内を対象として利用するには適していないといえる。そのため屋内では、電磁波やセンサー、ID タグなどを利用した位置推定方式が検討されているが、障害物が存在した際の精度悪化やスケラビリティの問題、環境構築の難しさ、設置コストがかかるといった問題が残る。

そこで、AR (Augmented Reality) マーカとよばれる付加情報を表示するためのパターン画像を用いた位置推定手法が注目されている。この方法では、印刷されたマーカを建物内に複数設置してそれらをカメラで読み取って得られた情報をもとに位置推定を行う。マーカはスマートフォンなどの端末のカメラで 2 次元コードと同様に容易に読み取ることができる。さらに、位置推定に電波信号を用いないので電波干渉の要因にはならず、環境構築が容易、省エネルギーなどの利点も挙げられる。さらに、端末ディスプレイ上で位置情報を知らせる他の手法とは違い、AR は現実空間上で情報表示（ナビゲーション時の方向指示など）ができるので、Google Glass などの眼鏡型ウェアラブル端末による自動位置取得において特に適用性の高い手法といえる。しかし例えばマーカが壁や天井、床などに設置してある場合、歩行中などのユーザーが意識することなくマーカを読み込むには斜めからのマーカ検出が必要不可欠である。一般的に、ユーザーがスマホなどで撮影したマーカ映像は画像の連続で構成されており、それらの画像を変換処理してマーカの検出が行われる。この際、斜めからでもマーカを読み取ることができるよう高精度な画像処理をリアルタイムに行おうとすると、瞬間ごとの画像を大量に処理しなければならず、処理系に膨大な負荷がかかる。その結果、一つの画像に複数のマーカが写っているなどの場合に処理時間が長くなってしまふ。一方、マーカ読み取りの際に斜めからの認識処理を省くと、AR マーカを読み込ませるた

めにカメラをマーカの正面に向けて撮影する必要があるので、一度立ち止まってマーカの方にカメラを向けなければいけないという利便性の問題がある。そこで低負荷で、かつユーザがヘッドマウントカメラ等を装着して歩行しているときに能動的な行動をすることなく自動でマーカを読み込ませることができるよう、錯視を利用した AR マーカを考えたい。錯視の中には、非常に大きく歪んだ図を描いておくことで、ある特定の位置から見ると違和感のない図になるようにするものがある。例えば、道路標示の「とまれ」という字は、真上から見ると非常に縦方向に伸ばされているが、道路上から見ると通常のフォントに見える。この錯視の性質を利用して、走行する車がブレーキをかける際に道路標示を真上からみることができない問題を解決している。この例のように、マーカを歪ませることによってカメラがマーカに対して斜めに接近しても、カメラには通常のマーカを正面から撮影したようにうつる。従って理論上は天井や床に設置されているマーカを、そこから遠い位置にあるカメラが捉えたときに認識可能であり、マーカを認識できたという事実からある程度の位置推定が可能となる。本論文では、錯視を利用したマーカを定義し、そのマーカを認識可能な範囲を数式で表現する。そして、通常の正方形のマーカと縦方向に引き伸ばしたマーカを用意し、マーカの認識可能範囲の検証実験を行った結果、縦横比を 5:2 にした錯視マーカを用いた場合、マーカを認識できない範囲がマーカの長辺に平行な方向に 56.7% 減少するなど斜めからの読み取りが大幅に改善されることがわかった。

2. 主な既存技術と問題点

屋内位置推定について次の技術が提案されている。

- (1) Wi-Fi (TOA, AOA, RSSI など)
- (2) RFID (Radio Frequency Identification) タグ
- (3) IMES (Indoor Messaging System)
- (4) 歩行者自律航法 (デッドレコニング, PDR)

Wi-Fi の電波信号を用いた位置推定には主に到来角度 (AOA: Angle of Arrival), 到来時刻 (TOA: Time of Arrival), 受信強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator, Fingerprint), などが利用される [2]。これらは Wi-Fi 機器の MAC アドレス, 位置座標の設定などの環境構築が必要である。いずれにおいても無線基地局と端末間に人混みや障害物が存在する場合、電波の干渉や反射により精度が落ちてしまう問題がある。RFID タグは ID 情報を送受信して現在地を取得することができる。高い精度で場所を特定できるが、読み取り機器と ID タグを非常に接近させなければいけない上に、ユーザの向きを知ることはできない [3]。IMES は GPS と同様の信号を屋内で発信する方式で、受信側は GPS と同様にしてスマートフォンで位置情報を利用できるようになるといわれているが、配信インフラが整備されおらず実現には時間がかかるとされている [4]。歩行者

自律航法はスマートフォンに内蔵されているジャイロセンサー、地磁気センサー、加速度センサーなどを利用して自分の位置を測定する。端末一つあれば可能なので設置コストが低い、誤差が蓄積されてしまう問題があり、誤差を補正するために他の手法と併用する必要がある [5]。

これらの既存技術は電波を用いた位置推定を行っており、位置推定のために無線帯域を使用することになるうえに、干渉の原因ともなりうる。そのため、本論文では電波を一切用いない位置推定方式を提案する。

3. AR マーカについて

カメラ映像の解析を基に情報提示を行う AR は画像認識型 AR と呼ばれ、リアルタイムでカメラの位置及び姿勢計算を行い映像画面に 3 次元 CG を表示する。画像認識型 AR は主に四角形のパターン画像を利用するマーカ型と現実にあるものをそのまま利用するマーカレス型に分類される。マーカレス型は景観を損なわないため商業向けイベントなどには適しているが、空間認識や特徴点抽出の計算量が大きく高度な画像処理システムが要求される、発見が困難などのデメリットがある [6]。よって位置推定の際には処理が高速でユーザーの意識が向かいやすいマーカ型の方が適しているといえる。マーカ型ビジョンベースド AR のライブラリは奈良先端科学技術大学院大学の加藤教授らの研究グループによって ARToolKit が提供されている。一般的に AR マーカには正方形でなければいけないという制約がある。マーカの処理はマーカ検出段階と AR 表示段階の二つに大きく分けられる。以下 3.1 節、3.2 節は文献 [7][8] 及び公開されているオープンソースを参考にした。

3.1 AR マーカの検出

まず、入力されたカメラ映像をグレースケール化し設定された閾値をもとに 2 値化を行う。次に各白色領域の外接矩形を求める。外接矩形に対してマーカの輪郭線追跡を行い 4 本の折れ線で近似できた領域がマーカの候補と判断される。そのためマーカは一部分でも隠れていると検出できない。その後、マーカの黒枠の比率をもとに黒枠を削除し、内部の四角形のパターンマッチングを行う。この時、射影変換を用いて歪んだ四角形を正方形に直す必要がある（正規化）。検出された四角形の各頂点の座標を $(x_1, y_1) (x_2, y_2) (x_3, y_3) (x_4, y_4)$ 、射影後の正方形の各頂点の座標を $(X_1, Y_1) (X_2, Y_2) (X_3, Y_3) (X_4, Y_4)$ とすると、二次射影変換の公式 $X_i = \frac{a_1 x_i + a_2 y_i + a_3}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1}$ 、 $Y_i = \frac{a_4 x_i + a_5 y_i + a_6}{a_7 x_i + a_8 y_i + 1}$ から透視変換行列 A が計算できる [9]。四角形の各頂点座標を要素とする行ベクトルを射影前と射影後それぞれ P, Q とすると、 $Q = AP$ が成り立つ。変換後の画像を解像度で分割し数値化を行い、パターンファイルとの一致率が誤差の範囲内であればマーカが特定される。

3.2 AR の表示

AR はモデル座標で登録されているので、カメラ画像に対して AR を正しく配置するには、マーカの位置及び姿勢計算を行い、ビュー座標への変換行列を求める必要がある [10]。変換行列は 9 つの拡大縮小・回転移動成分と 3 つの平行移動成分からなる。まず、特定したマーカの黒枠の頂点のスクリーン座標から 4 辺のビュー座標での式を求める。次に各辺をカメラの投影方向に引き延ばしていき、原点とスクリーン上のマーカの辺、対応する現実空間のマーカの辺を通る 4 つの面を作成する。3 次元空間のマーカの 4 頂点を原点からのベクトルで $p, p+q, p+r, p+q+r$ と表し、 $p = \alpha q + \beta r + \gamma (q \times r)$ とおくと、向かい合う面の交線ベクトルはそれぞれ

$$\{p \times (p+q)\} \times \{(p+q) \times (p+q+r)\} = -\gamma |q \times r|^2 q \quad (1)$$

$$\{p \times (p+r)\} \times \{(p+r) \times (p+r+q)\} = -\gamma |r \times q|^2 r \quad (2)$$

となり、交線ベクトルを求めることでマーカの辺方向のベクトルがわかる。この時、2 つの交線ベクトルを互いに垂直なベクトルに変換することによって誤差を補正している。このことからマーカは向かい合う辺が平行かつ各頂点が直角であればよい。従って理論上はマーカは正方形以外に長方形でも AR の表示が可能である。また、これらの外積を求めることによって、マーカに垂直なベクトルが求まる。よって変換行列の拡大縮小および回転移動成分を導出できる。これを利用して、スクリーン上のマーカの頂点座標と 3 次元空間でのマーカの頂点座標から残りの平行移動成分も求められる。

3.3 AR マーカを用いたナビゲーション

近年、マーカを利用した建物内でのナビゲーションについての研究が行われている [11]。ユーザーが端末のカメラでマーカを読み取るとマーカの情報がサーバに送られる。サーバは建物内に配置したすべてのマーカの位置情報を管理しており、送られてきたマーカの情報と合わせてユーザーの正確な位置がわかる。また、マーカを読み取って CG を表示するときに行われる距離・姿勢計算からカメラ地点の空間的な位置推定が可能である。つまり、ユーザーがマーカからどのくらい離れているかを計算できる。よって、ルート選択やカメラ距離に応じた方向指示を CG 上で表示させて適切なナビゲーションを行うことができる。また、別ユーザーの位置情報をサーバで共有することによって、混雑時や災害時などにマーカ表示を変えるだけで最適なルートに変更できるなどの対応も可能である。

ただし、これらの方式ではカメラを注意深くマーカに向けないと読み取りに失敗してしまう。ヘッドマウント型のカメラを装着しながら歩くだけで AR マーカを読み取ってナビゲーションを行うなど、人々がマーカの存在を気にすることのない AR マーカを用いたナビゲーションを実現す

るには、読み取り側の計算量が小さいという条件で、かつ斜めから高精度に読み取れるマーカが必要である。

4. 錯視を利用した AR マーカ

入力画像には誤差が必ず存在する。AR マーカは通常は正方形に設計されており、その正方形を正面からカメラで撮影することで正確に読み取ることができる。この際、単純な拡大縮小で正規化が可能なので射影変換による誤差の増大が起りにくい。しかし、マーカの配置によってはユーザーが移動中にカメラをマーカの正面に向けることは困難な場合が多い。正面以外の方向からマーカを撮影するとカメラ画像にはマーカが歪んで表示される。このとき、

- (1) 映像上のマーカの縦横の比が大きく異なる。
- (2) 映像上のマーカの縦横どちらかの幅が狭い。

などの場合は射影変換を行うことで誤差が大きくなり、マーカの特定に失敗する。最小 2 乗法などを用いて射影変換時の誤差を小さくする方法 [12] や、カメラの解像度を上げる方法では、画像処理の計算量が大きくなり負荷が大きくなってしまふ。また、マーカ一致率の許容範囲を増やすと、認識範囲は広がるが誤認識のリスクが増えてしまふ。そこで、同負荷という条件下で、マーカの認識範囲を正面から斜めに変化させるために、長方形を斜めから見たときに正方形に見えるという錯視の性質を利用した。ここではマーカの認識範囲がどのように変化するかを調べた。

なお、長方形のマーカでも位置・姿勢計算が可能であることは 3.2 節で述べた。原点にマーカを配置した 3 次元空間を設定する。マーカの短辺と平行な方向に x 軸、マーカの長辺と平行な方向に y 軸、マーカ面と垂直な方向に z 軸を定める。カメラの光学中心を 3 次元極座標で (r, ϕ, θ) と表す。マーカの縦と横の長さをそれぞれ $a, b (a \geq b)$ とし、スクリーン座標系でのマーカの縦と横の長さをそれぞれ a', b' とする。マーカ辺の長さをスクリーン座標に変換する際の比例定数を k 、遠近法によるマーカ辺の長さの比例定数を l とする。マーカの幅が距離に対して十分小さいとし、遠近法によるマーカの向かい合う辺の長さの差を無視できるとすると、

$$a' \simeq \frac{kl}{r} a \sqrt{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta} = k l a \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

$$b' \simeq \frac{kl}{r} b \sqrt{1 - \sin^2 \phi \sin^2 \theta} = k l b \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

と近似できる。特定に失敗しないマーカの縦横の比率の最大値を e とすると、

$$\frac{1}{e} \leq \frac{a\sqrt{y^2 + z^2}}{b\sqrt{x^2 + z^2}} \leq e \quad (5)$$

が得られる。

ここで仮に $e = 2$ とする。 $\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}$ と変化させるとマーカの推定認識範囲はそれぞれ図 1 (4 つの閉空間の外部) のようになる。図 1 の赤軸は x 軸、緑軸は y 軸、青軸は z 軸を表している。マーカを認識できない範囲について

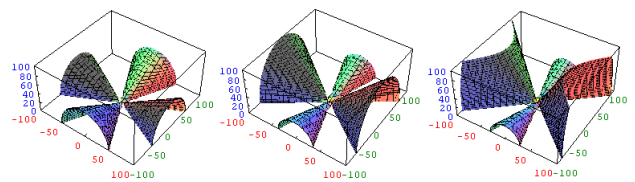


図 1 マーカの推定認識範囲 (左から $\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}$)

Fig. 1 Estimated recognition range of marker ($\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}$)

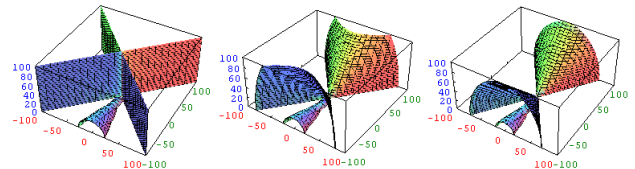


図 2 マーカの推定認識範囲 (左から $\frac{a}{b} = 2, \sqrt{6}, 2\sqrt{2}$)

Fig. 2 Estimated recognizable range of marker ($\frac{a}{b} = 2, \sqrt{6}, 2\sqrt{2}$)

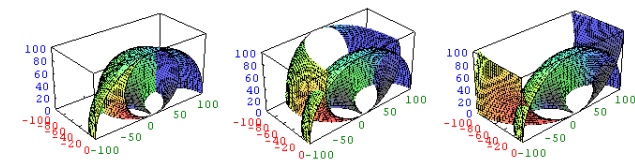


図 3 マーカの推定認識範囲 (左から $\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, 2$)

Fig. 3 Estimated recognizable range of marker ($\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, 2$)

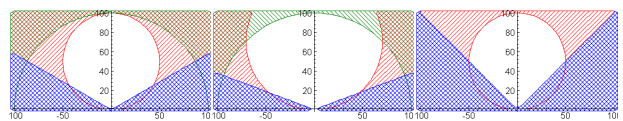


図 4 正方形のマーカの x 軸上での認識範囲及び $\frac{a}{b} = \sqrt{2}$ としたときのマーカの x 軸、 y 軸上での認識範囲

Fig. 4 Estimated recognizable range of marker ($\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}$ (x,y-axis))

マーカの長辺に平行な方向 (y 軸方向) は縮小しそれと直行する方向 (x 軸方向) は拡大することが読み取れる。また全体的に認識範囲は狭くなっている。多くのマーカが正方形に制約されているのはこのためであると考えられる。

さらに $\frac{a}{b} = 2, \sqrt{6}, 2\sqrt{2}$ と変化させるとマーカの推定認識範囲はそれぞれ図 2 のようになる。 $\frac{a}{b} \geq e$ のとき認識範囲は y 軸方向にのみ展開される。この性質を利用して、カメラの侵入方向に応じて異なる AR を表示させて高度なナビゲーションを行うことが可能である。

また、許容できるマーカの縦横幅を f とすると $a', b' \geq f$ が成り立つ。ここで仮に $\frac{f}{kla} = 0.01$ とする。 $\frac{a}{b} = 1, \sqrt{2}, 2$ と変化させるとマーカの推定認識範囲はそれぞれ図 3 (2 つの閉空間の重なり合った部分) のようになる。

以上のことから、正方形のマーカの x 軸上での認識範囲、 $\frac{a}{b} = \sqrt{2}$ としたときのマーカの x 軸、 y 軸上での認識範囲を表したのが図 4 (白い領域で表された部分) である。 x 軸、 y 軸上での認識できない範囲は原点からの距離に対

表1 マーカの寸法

Table 1 The sizes of the markers

マーカ	pixel	mm
A	500 x 500	91.0 x 91.0
B	500 x 400	113.5 x 90.5
C	500 x 300	130.0 x 78.0
D	500 x 200	

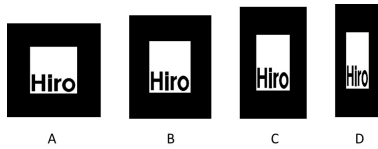


図5 実験で使用した AR マーカ

Fig. 5 The figure of markers

表2 使用機器

Table 2 Use equipments

カメラ	Logicool HD Webcam c525 (解像度 1280 x 720)
ライブラリ	ARToolKit (画面解像度 640 x 480)

してある地点(直線と円の交点)までは距離に比例して大きくなり、その後急激に拡大することがわかる。これは斜めからのマーカの読み取りが正面からの読み取りに比べてマーカとの距離が離れるにつれ大幅に困難になることを示している。

5. 検証実験

5.1 実験方法

本実験では長方形の AR マーカを製作して 3 次元の認識範囲を測定した。実験は実際の環境を想定して屋内で行った。マーカは認識条件を一定に保つため、マーカは常に蛍光灯直下の白床面に配置した。マーカは同じパターンで縦横比を変えた A~D の 4 種類を作成した(表 1, 図 5)。今回使用した機器などを表 2 に示す。カメラは一般的なオートフォーカス機能付き WEB カメラを使用した。本実験で使用した ARToolKit は図 5 のマーカを認識するとマーカの縁に沿って立方体を表示させる。マーカの認識率が下がると立方体が点滅状態になる。本実験ではマーカを 5 秒間連続で認識し続けられた場合に認識成功とみなし、5 秒間で認識できなかった瞬間が存在すれば認識失敗とみなした。実験中は常にカメラ映像の中央にマーカが写るようにした。まず、カメラとマーカの中心との水平距離が 100.0mm の床面にマーカの長辺に平行な向きとカメラの向きが平行になるようにマーカとカメラを設置した。実験は次のような手順で A~D それぞれのマーカについて行った。

- (1) カメラを徐々に床から垂直に離していきはじめてマーカを認識したときの高さを測定した。
- (2) カメラとマーカとの水平距離を 200.0mm, 300.0mm, ... と変化させてそれぞれの場合で 1 の操作を行った。

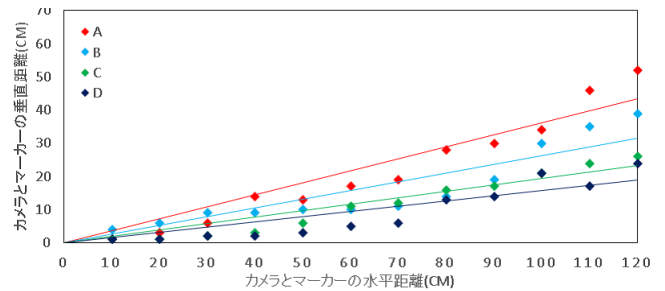


図6 マーカの認識開始地点(0°方向)

Fig. 6 Recognition start point of the markers (0°direction)

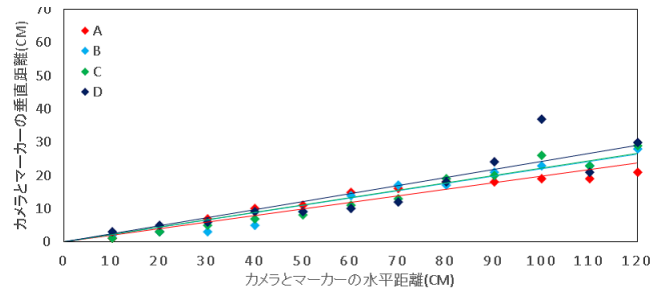


図7 マーカの認識開始地点(45°方向)

Fig. 7 Recognition start point of the markers (45°direction)

表3 マーカを認識できない範囲の変化

Table 3 Range that the markers can not be recognized

マーカ	0°方向	45°方向	90°方向
A	(-)	(-)	(-)
B	-27.5%	+11.1%	+0.6%
C	-45.9%	+11.2%	+11.2%
D	-56.7%	+22.8%	+40.8%

- (3) マーカの長辺に平行な向きとカメラの向きのなす角を 45°, 90°と変化させて 2 の操作を行った。

得られた数値から、マーカの種類、マーカの向きが認識範囲にどのような影響を与えるか調べた。なお、すべての画像に対して処理を行うのはパターン識別に失敗することがあるので、ARToolKit では一度認識したマーカの位置を記憶しておき、次画像のマーカの位置と類似している場合は同じマーカとみなす処理を行っている。従って今回測定したのは認識開始地点であり、認識履歴などを用いた補助を行わないマーカ認識ソフトでは認識可能範囲が異なる可能性がある。また、カメラの高さが 1700.0mm を超える位置ですべてのマーカの認識が確認できた。これ以上の高さでの測定が困難であったため認識可能範囲の上限の測定は行っていない。また、カメラと正方形のマーカとの水平距離が 1200.0mm 以上離れると認識失敗となったため、それより遠い距離での計測結果は図示していない。この距離は図 4 の赤円の半径に相当すると考えられる。

5.2 実験結果

マーカの長辺と 0°, 45°, 90°の角をなす向きでのマーカの

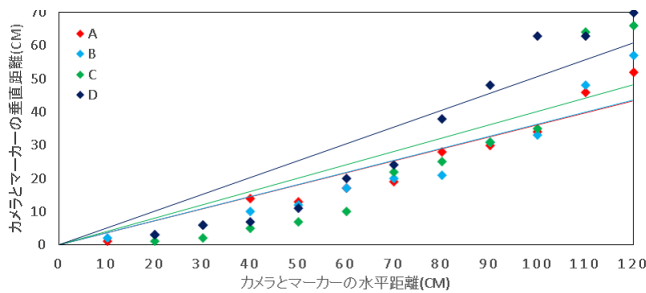


図8 マーカの認識開始地点 (90°方向)

Fig. 8 Recognition start point of the markers (90°direction)

認識開始地点をそれぞれ図6, 図7, 図8に示す. 図6~図8の直線はA~Dのマーカで得られた数値をそれぞれ最小2乗法で直線近似したものであり, AからDのマーカごとの認識範囲の違いを明らかに示すためのものである. マーカを認識できない範囲はカメラ距離が700.0mmの辺りまではカメラの距離にほぼ比例して大きくなるがそれ以降は急激に拡大することが確認できる. また, マーカを認識できない範囲の変化を表3にまとめた. 表3では負の値をとると認識できる範囲が増加することを意味し, 正の値をとるとマーカを認識できる範囲が狭まることを意味する. DのマーカはAのマーカに比べて認識できない範囲がマーカの長辺に平行な方向に56.7%減少し, それと垂直な方向に40.8%増加するなど大幅に変化した. また, 図8において, マーカを歪ませるにつれて認識範囲は少しずつ狭くなり, DのマーカはAのマーカに比べて認識できない範囲が22.8%と少し増加した. これらの結果は, 図1~図4の認識範囲の形状と合致する.

C及びDのマーカはカメラ距離1200.0mm, 45°の地点で測定した際に立方体の上下が逆に表示されるARの反転現象が起きた. これはAR表示段階でマーカの向かい合う辺の手前側と奥側を逆に認識してしまうことで起こると考えられる. 4章では遠近法によるマーカの向かい合う辺の長さの差を無視したが, マーカの向かい合う長辺の長さの差を $\Delta a'$, マーカの向かい合う短辺の長さの差を $\Delta b'$, マーカの向かい合う長辺の距離の差を Δra , マーカの向かい合う短辺の距離の差を Δrb とし, マーカの幅が距離に対して十分小さいとすると,

$$\Delta a' \simeq \left(\frac{kl}{r} - \frac{kl}{r + \Delta ra} \right) a \sqrt{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \theta} \quad (6)$$

$$\Delta b' \simeq \left(\frac{kl}{r} - \frac{kl}{r + \Delta rb} \right) b \sqrt{1 - \sin^2 \phi \sin^2 \theta} \quad (7)$$

が成り立つ. $\Delta a'$ または $\Delta b'$ が最大となるのは $\phi = \frac{n\pi}{2}$ (n は整数) のときである. このときマーカの向かい合う辺の長さの差は遠近法のため大きくなり手前側と奥側を誤って認識してしまうことが起こりにくい. 反転現象が0°, 90°で起こらなかったのはこのためだと考えられる. また, b が小さくなるにつれて $\Delta b'$ も小さくなるのがわかる. このときマーカの向かい合う辺の長さの差が小さくなりこの

差を画像処理の誤差が上回ると反転現象が起こると考えられる. C, Dのマーカのみで反転現象が起こったのはこのためだと考えられる. a の値を一定として b の値を大きくすればこの現象は起こりにくいと考えられるが, その分マーカの設置スペースを広くとる必要がある. これが長方形のマーカを用いてARを表示させる際の課題である.

6. まとめ

本研究では, 錯視を利用したマーカで斜めからの読み取りが可能になるかを調べるためにマーカの認識範囲を計算式を用いて推定し, 実際に正方形のマーカと錯視マーカを用意してそれぞれのマーカの認識できる範囲を測定した. その結果, 斜めからのマーカの読み取りは正面からの読み取りに比べて距離が離れるにつれ大幅に困難になること, 錯視マーカにおいても一部のARが反転する地点を除いて安定したARの表示が可能であること, 錯視マーカは正方形のマーカに比べカメラの向きによって斜めから認識できる範囲が大幅に増えること等が確認でき, 推定した認識範囲の形状が正しいことが確認できた. このことから, 天井や壁などに錯視ARマーカを張り付けて歩行者に行動を促すことなくマーカを認識させることが可能であることが分かった.

参考文献

- [1] 和田恭: 米国におけるWiFi位置情報ソリューションの動向, 情報処理機構 (2013).
- [2] 川内見作: WiFi室内環境位置推定技術の開発.
- [3] 流通システム開発センター: RFID技術動向・運用環境調査報告書, 入手先 (<https://www.dsri.jp/epcgl/pdf/h19 RFID tech trend study.pdf>) (1998).
- [4] 宇宙航空研究開発機構: 日本発の屋内外シームレス測位の実現へ, 入手先 (<http://www.jaxa.jp/article/special/michibiki/yoshitomi j.html>) (2014.5.26).
- [5] 信学技報: 歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術, 電気情報通信学会 (2011).
- [6] 亀田能成: マーカレスAR, 映像情報メディア学会誌 Vol. 66, No. 1, pp. 45~51 (2012).
- [7] ARToolkit: ARToolkit Framework, 入手先 (<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/devframework.htm>)
- [8] 加藤博一, Mark Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカ追跡に基づく拡張現実システムとそのキャリブレーション, TVRSJ Vol.4 No.4 (1999).
- [9] OpenCV: PerspectiveTransform, 入手先 (http://opencv.jp/opencv-1.0.0/document/opencvref_core_algebra.html#decl_cvPerspectiveTransform).
- [10] ARToolkit: Coordinate Systems, 入手先 (<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/cs.htm>)
- [11] 永松明, 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: 屋内環境におけるモバイルプロジェクト型AR案内システム, 日本バーチャリアリティ学会論文誌 Vol.14, No.3 (2009).
- [12] 菅谷保之, 金谷健一: 基礎行列と射影変換の計算精度の比較: 最小二乗法から超精度くりこみ法まで, 情報処理学会研究報告 (2012).