

レンチキュラーレンズを用いた姿勢検出のための視覚マーカ

田中 秀幸[†] 角 保志[†] 松本 吉央[†]

[†] 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: †{hideyuki-tanaka,y.sumi,yoshio.matsumoto}@aist.go.jp

あらまし 視覚マーカはロボットの自律作業を支援するツールとして有用である．従来の平面視覚マーカはとくにマーカと正対したときの姿勢計測精度が悪く，安定しないという問題があった．そこで本研究では，新しい原理に基づく平面視覚マーカを開発し，正面付近からの観測でも高精度に姿勢情報を検出可能とした．これはレンチキュラーレンズと白黒の縞模様の組み合わせにより視線方向に応じて変化する濃淡パターンを表示するマーカであり，単眼カメラによって 1 軸周りの回転角度を検出可能である．我々はそのための画像処理アルゴリズムを合わせて開発し，性能検証を行って従来の視覚マーカを上回る安定かつ精密な角度測定が可能であることを明らかにした．また，本マーカをロボットアームのハンドの位置合わせタスクに応用することで，その有用性を示した．

キーワード 視覚マーカ，姿勢検知，ビジュアルサーボ，サービスロボット，環境構造化

1. はじめに

平面視覚マーカは，単眼のビジョンセンサによってその ID および位置姿勢を認識可能なパターンであり，ロボットによる物体認識および位置姿勢計測を支援するツールとして非常に有用である．とくに今後のサービスロボットの実用化に際して，確実な自律作業を支援するシステムの構築に不可欠な要素といえる [1][2][3]．

従来のマーカは主に AR(Augmented Reality) の分野で開発され，ロボティクスにおいても複数のものが利用されている．いずれも画像処理による姿勢計測の原理はほぼ共通であるが，正面付近から観測したときの姿勢計測が安定せず，精度が悪いという問題があった [4][5][6]．ロボットタスクではマーカを正面から観測して位置合わせを行うことが多いため，この影響は深刻である．

本研究では，全く新しい原理に基づく視覚マーカを開発し，この問題を解決した．これは，レンチキュラーレンズと白黒の縞模様の組み合わせにより，視線角度に応じて変化する濃淡パターンを表示するマーカである．そのパターンを画像処理で解析することで，正面付近からの観測でも精度良くカメラとマーカの視線角度を検出可能である．そのため，とくにロボットタスクでの位置合わせにおいて，このマーカの使用が効果的と考えられる．

本章以降の構成は以下の通りである．2 章では従来マーカとその問題点について概観する．3 章において，提案するマーカの設計と開発について述べる．4 章では，このマーカから角度情報を得るための画像処理アルゴリズムについて述べる．5 章では，性能検証実験を通じ，本マーカが従来マーカを上回る精度と安定性をもつことを示す．6 章において，本マーカの活用例としてロボットアームによる物体操作タスクを扱い，実システムにおける有用性を示す．最後に本マーカの今後の展望を示す．

2. 平面視覚マーカ

2.1 従来の視覚マーカ

平面視覚マーカは，Augmented Reality(AR) やロボティクスの分野で活用されている．代表的なものとしては，ARToolKit，ARTag，CyberCode，ARToolKitPlus などがある [7] (図 1)．また，QRCode [8] のように多くの情報を記録可能なマーカを用いる例もある [1][2]．

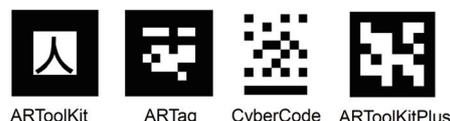


図 1 Examples of existing visual markers

2.2 従来マーカの問題点

従来の平面視覚マーカの多くは，射影変換の原理を用いた幾何的計算により位置と姿勢を検出している．ここでは位置関係が既知の 4 点 (マーカの 4 つのコーナー等) を抽出し，画像中におけるそれらの位置からカメラとマーカの相対的な位置・姿勢を一意に決定する．この方式では画像上での検出点のずれが姿勢精度に影響し，とくにマーカと正対したとき，つまりマーカ平面と視線が垂直に近い位置関係のときに精度が悪化する．この原因の定性的な説明を図 2 に示す．

計測値のちらつき (jitter) については，平均フィルタやカルマンフィルタ，パーティクルフィルタ等を用いたり [4][10]，計測履歴を利用したりして (ARToolKit など [9]) 安定化が図られている．しかし，いずれも原理的に計測姿勢値の「正しさ」を保証するものではなかった．AR 分野では姿勢精度が高くなくても視覚的な表示にはそれほど影響はないが，物体操作を伴うロボティクスで

は姿勢の誤差が大きく影響するため、これは重要な問題であった。

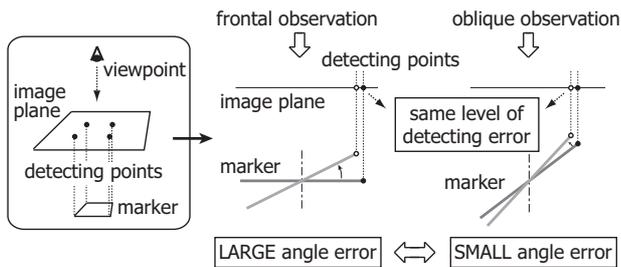


図 2 Difference of angle measurement error according to direction of observation

3. レンチキュラーレンズを用いた新しい視覚マーカの開発

この問題を解決するため、本研究では従来と全く異なる原理に基づいて姿勢情報を検出する視覚マーカを開発した。その鍵は視線とマーカの1軸回りの角度に応じて見た目が変化する濃淡パターン (Rotation Angle Scale : RAS) の発明である。このRASを用いて構成する本マーカをRASマーカと呼ぶ。本章では、RASおよびRASマーカの詳細を述べる。

3.1 RASの構造

図3にRASの構造を示す。RASは普通紙に印刷した黒白の縞模様の上にレンチキュラーレンズ(シート)を貼り付けて作られる。

3.2 RASのパターン変化の様子

図4にRASのパターン変化の様子を示す。視線角度に応じて、色の黒い部分が回転軸と垂直な方向に移動する。

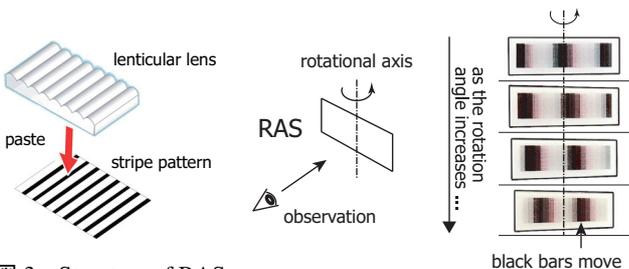


図 3 Structure of RAS

図 4 Pattern variation of RAS

3.3 RASのパターン変化の原理

レンチキュラーレンズはシリンダー状の小さなレンズを等間隔に並べたレンズであり、見る角度に応じてその下にある絵の異なる部分を拡大して見せる効果をもつ。そのため、縞模様の白黒ラインの間隔をシリンダーレンズのピッチと同じにすると、図5のように見る角度に応じて全体の色が白と黒の間で変化するシートができる。

ここで、縞模様の間隔をレンズのピッチより少し広く

取ると、図6のように視線角度に応じて黒い部分が移動するようになる。これがRASの濃淡パターンが視線角度に応じて変化する原理である。

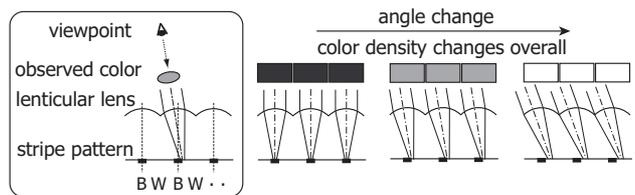


図 5 Principle of pattern variation: case of equal pitch

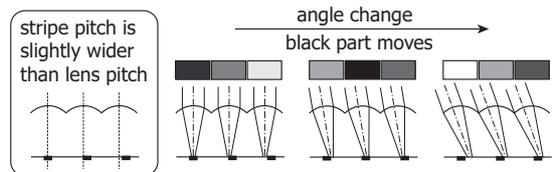


図 6 Principle of pattern variation: case of different pitch

RASにおいて、最も黒く見える部分を黒ピークと呼ぶ。視線群が平行(視点が無限遠にある)と仮定すると、黒ピークはレンズ数とライン数の差が1になる位置ごとに周期的に現れる。

3.4 RASユニットの設計

RASによる視線角度計測では、黒ピークの位置を画像処理によって特定する必要がある(4章参照)。そこで、その処理がしやすいよう、パターン表示部に4つの計測基準点を加えることでRASユニットを構成した(図7)。

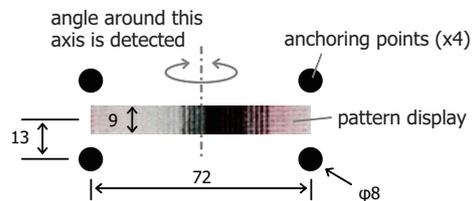


図 7 Design of RAS unit: The sizes have no unit

また、図8に示すように、縞模様の黒い線の太さに応じて濃淡パターンの見え方が変わる。今回は、この中で最も明瞭なパターン抽出が可能な「 $n=2$ 」を選定し、図8右のように黒線の領域が全体の4分の1となる縞模様を用いてRASを作成した。

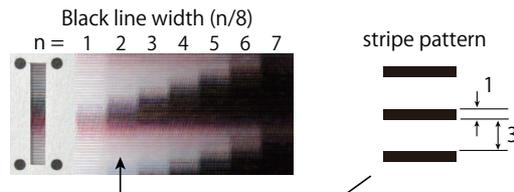


図 8 Difference of pattern appearance according to black-line width

3.5 RAS マーカの設計

上記のユニットだけではマーカのIDや向きを識別することができない。そこで、これらの情報を提供するために、既存の平面視覚マーカをRASユニットと組み合わせ使用するのが実用的である。本研究では、図9のようにARToolKitPlus マーカ [11] と組み合わせ、これをRAS マーカとした。

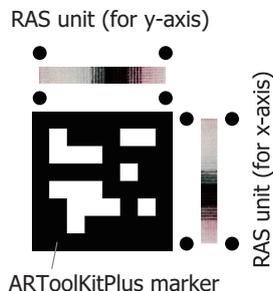


図9 Design of RAS marker

4. 視線角度検出のためのアルゴリズム

画像処理によってRAS マーカから視線角度情報を取得するアルゴリズムを述べる。なお、ここでは図9に示すRAS マーカのうち、y軸用のユニットについて説明する。x軸用のユニットについても処理内容は基本的に同じである。

4.1 黒ピーク位置の検出

下記の手順によって黒ピーク位置を求める(図10)。

- (1) ARToolKitPlus マーカを検出し、IDおよび位置姿勢を認識
- (2) その位置を基準にRAS マーカの存在領域を抽出
- (3) 抽出した領域が一定の大きさになるように画像をリサイズ
- (4) 二値化、領域分割
- (5) 面積、寸法、縦横比のフィルタにより4つの計測基準点を抽出
- (6) 4点の位置から射影変換行列を求める
- (7) マーカを正面から見た形になるように画像を変換(長手方向のサイズは480ピクセル)
- (8) パターン表示部の中心軸上32点の輝度を取得
- (9) パラボラ近似により輝度が極値となる点(黒ピーク)の位置を求める

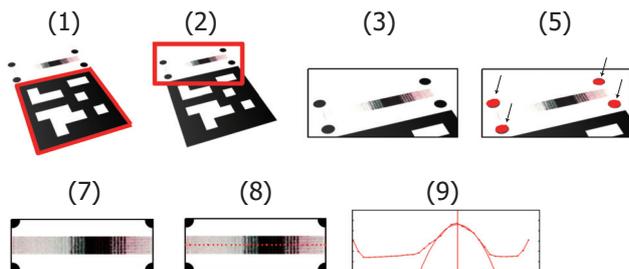


図10 Image processing for black-peak detection

視線角度の計測に関わるステップ(3)以降の処理は、既存のマーカ(ここではARToolKitPlus)とは独立に行われるため、既存マーカの計測精度はRASユニットの計測に影響しない。また、ステップ(7)において、RASユニットが一定の形状とサイズに変換された上で黒ピーク位置の検出が行われるため、マーカのサイズに関係なくこのアルゴリズムが適用可能である。

なお、ステップ(9)では輝度を反転させており、明るさが小さいほど値が大きくなるように表示している。

4.2 ロバストな計測のためのマーカ設計と観測方式

照明条件や観測距離に対する計測のロバスト性を高めるための、本マーカの設計上の工夫は以下の通りである。

4.2.1 円形の計測基準点の利用

RAS マーカのコーナーと計測基準点の画像を2種類の閾値によって二値化した様子を図11に示す(それぞれの結果がグレーと黒で塗られている)。このように、照明変動や焦点のブレがあった場合でも、コーナー検出に比べて円形基準点の中心(重心)の位置は変動が少ない。本マーカではこうした円形基準点を用いてステップ(7)を実行し、環境条件に対して変動の少ない画像変換ができるようにした。

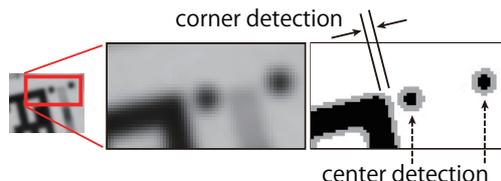


図11 Center detection robust to illumination variation and blur

4.2.2 濃淡の極値を求める黒ピーク検出

黒ピーク位置は、暗さの最大値付近の数点を用いたパラボラ近似によって検出している。この方式であれば、画像全体の輝度値や焦点のブレがある場合でも、暗さの極大値の位置は原理的に不変であるため、測定条件に左右されにくいロバストな観測が可能である。

4.2.3 画像上の誤差の影響が小さい観測モデル

観測の誤差が生じるのはステップ(5)と(9)である。(5)は(7)に影響を与えるが、一つの計測基準点の1[pixel]の観測誤差が黒ピーク位置の検出に与える影響は1/480[pixel]程度である。また、5.2.4で示すように、(9)での1[pixel]の検出誤差は視線角度の0.17[deg]程度であり、従来の視覚マーカと比較すると(図2参照)、画像上の検出誤差が計測結果に与える影響は非常に小さい。

5章で本マーカの性能検証を行い、従来マーカを上回るロバストかつ安定した角度検出能力を実証する。

4.3 黒ピーク位置から視線角度への変換

図12に、視点 p_v 、黒ピーク位置 x_{bp} 、および視線角度 θ_{vy} の位置関係を示す。このように、本研究では p_v と黒

ピークを結ぶ直線の、RAS ユニットの回転軸周り（ここでは y 軸回り）の角度を視線角度 θ_{vy} と定義する．視線角度と黒ピーク位置の関係は RAS ユニットごとに一対一なので、この対応関係を把握していれば黒ピーク位置から視線角度を知ることができる．

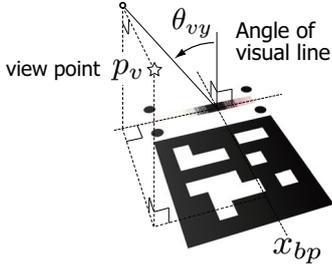


図 12 Angle of visual line

対応関係を知るための方法は 2 つある．

- i) RAS の光学的モデルから導出
- ii) 事前に RAS を実測して対応関係グラフを作成

ii) の方法は、確実ではあるが、RAS ユニットごとに多数の実測データを事前に収集する必要があるため煩雑である．したがって今回は i) の方法を試みた．

今回使用したレンチキュラーレンズは詳細なスペックが非公開であり、公称値として知ることができるのはレンズの間隔のみである．したがって、RAS の光学モデル作成は以下の仮定の下で行った．

- (1) 各レンズ表面は半径 r の円筒表面の一部である
- (2) 黒ピークが観測される位置では、視線と黒い線の中心が交わっている
- (3) レンズ形状および縞模様の形状に関する各種パラメータの正確な値は未知である
- (4) レンズの軸と縞模様の線は平行である^(注1)

仮定した RAS の光学的モデルを図 13 に示す．ここで、各種パラメータの定義は以下の通りである．

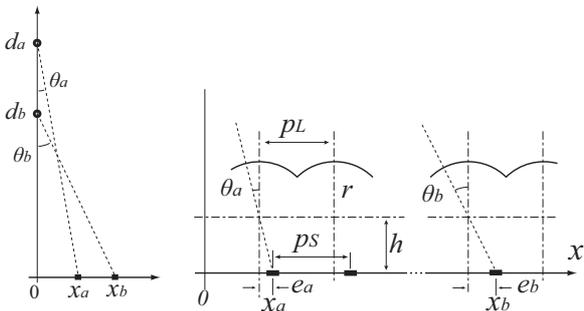


図 13 Optical model of RAS

p_* : パターンの間隔 (*は L : レンズ, S : 縞模様), x : RAS ユニット原点と黒ピークの距離 (画像上のピクセル数ではなく実距離), θ : 視線角度, h : レンズの円筒中

(注1) : 縞模様が少しでも斜めに貼られていると明らかな変化がパターンに現れるため、本仮定を満たさない RAS は製作時に排除できる．

心と縞模様までの距離, d : 観測視点と RAS 平面の距離, n : ある自然数, e : レンズの中心線と黒い線の中心の距離
各パラメータが未知という条件下で方程式を解くために、2 点からの RAS ユニットの観測値を利用する．ここでは、RAS ユニット原点の鉛直線上、距離が d_a, d_b の 2 点から、黒ピーク位置 (原点からの距離) x_a, x_b がそれぞれ得られたものとする (図 13) ．

まず、ある自然数 n_b を用いて

$$x_b = x_a + n_b p_s \quad (1)$$

と表せるので、

$$\delta p = p_s - p_l \quad (2)$$

とすると

$$e_b = e_a + n_b \delta p \quad (3)$$

が成り立つ．式 (1) より

$$n_b = (x_b - x_a) / p_s \quad (4)$$

である．また、幾何的相似により

$$x_a / d_a = e_a / h \quad (5)$$

$$x_b / d_b = e_b / h \quad (6)$$

が成り立つ．観測した黒ピーク位置 x_p から視線角度 θ_p が求まるとすると、同様に以下が成り立つ．

$$x_p = x_a + n_p p_s \quad (7)$$

$$e_p = e_a + n_p \delta p \quad (8)$$

$$\theta_p = \tan^{-1}(e_p / h) \quad (9)$$

式 (7) より

$$n_p = (x_p - x_a) / p_s, \quad (10)$$

式 (8)(10) より

$$e_p = e_a + \delta p (x_p - x_a) / p_s, \quad (11)$$

式 (3)(4)(6) より

$$e_b = e_a + \delta p (x_b - x_a) / p_s = h x_b / d_b, \quad (12)$$

そして式 (5)(12) より

$$h x_a / d_a + \delta p (x_b - x_a) / p_s = h x_b / d_b \quad (13)$$

となる．ここで、

$$x_b / d_b - x_a / d_a = A \quad (14)$$

$$x_b - x_a = B \quad (15)$$

とすると、式 (13) より

$$h = B \delta p / (A p_s), \quad (16)$$

式 (5)(16) より

$$e_a = x_a B \delta p / (d_a A p_s), \quad (17)$$

式 (11)(17) より

$$e_p = x_a B \delta p / (d_a A p_s) + \delta p (x_p - x_a) / p_s, \quad (18)$$

式 (16)(18) より

$$e_p / h = x_a / d_a + (x_p - x_a) A / B, \quad (19)$$

式 (14)(15)(19) より

$$e_p / h = x_a / d_a + (x_b / d_b - x_a / d_a) (x_p - x_a) / (x_b - x_a), \quad (20)$$

そして、式 (9)(20) より

$$\theta_p = \tan^{-1} \left\{ \frac{x_a}{d_a} + \left(\frac{x_b}{d_b} - \frac{x_a}{d_a} \right) \frac{(x_p - x_a)}{(x_b - x_a)} \right\} \quad (21)$$

となる。ここで、RAS ユニットのパターン表示部の長さを w 、4.1 の画像処理で検出した黒ピーク位置を p [pixel] とすると、

$$x_p/w = p/480 \quad (22)$$

が成り立つので、式 (21)(22) より、黒ピーク位置 p と視線角度 θ_p の関係は次式で表される。

$$\theta_p = \tan^{-1} \left\{ \frac{x_a}{d_a} + \left(\frac{x_b}{d_b} - \frac{x_a}{d_a} \right) \frac{\frac{w}{480}p - x_a}{x_b - x_a} \right\} \quad (23)$$

この視線角度と黒ピーク位置の対応関係は、本節の冒頭で示した理想的な仮定に基づいて導出した簡易的なものである。しかし、このモデルによって実測値をある程度近似できることを次章で確認する。

5. RAS マーカの性能検証

本章では、RAS マーカと既存マーカの一つ (ARToolKitPlus マーカ) を比較することにより、RAS マーカの性能を検証する。検証内容は「正面付近から観測したときの安定性と分解能」、「モデルの適合度」、そして「認識距離や照明条件に対する安定性の変化」である。

5.1 計測環境

計測環境を図 14 に示す。RAS ユニットの計測基準点も含めた長辺が 10mm のもの、比較用の ARToolKitPlus マーカは 1 辺が 10mm のものを使用した。観測用のビジョンセンサは、小型・単焦点の USB CMOS カメラ (マイクロビジョン, MCM4603) である。カメラの対角画角は 56.3deg、解像度は VGA である。カメラとマーカが正対した状態を角度 0deg とし、 y 軸周りにマーカを回転させて、 y 軸用 RAS ユニットの黒ピーク位置 p_y [pixel] と、ARToolKitPlus マーカが示す y 軸周りの回転角 θ_y をプロットした。カメラとマーカの距離は 133mm であり、画像上での RAS のパターン表示部の長さは正対時で約 51 ピクセルである。RAS ユニットで用いたレンチキュラーレンズは 75LPI (1 インチあたりのレンズ列数が 75) のものを使用した。通常の白色蛍光灯によるオフィス照明の環境下で測定した。同一条件下での計測とするため、2 つのマーカのデータを同時に取得した。

5.2 計測結果

RAS ユニットの黒ピークを検出しているときのスクリーンショットを図 15 に示す。

5.2.1 RAS ユニットの測定可能範囲

約 ± 30 deg の視線角度を測定可能であった。なお、以降のデータは、マーカの正面付近に限定し、-10deg から +10deg の間で 1deg ごとに回転角を変えて測定した結果を示す。

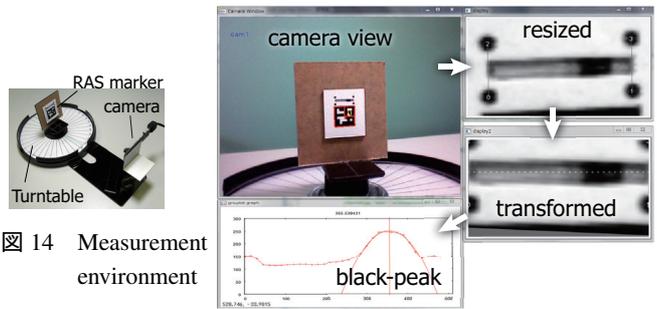


図 14 Measurement environment

図 15 Screenshot of black-peak detection

5.2.2 比較用 ARToolKitPlus マーカの測定結果

図 16 に結果を示す。各回転角で 20 回の計測の平均をプロットし、データのばらつきを示す標準偏差をエラーバーで示した。正しく測定できていれば右肩上がり直線上に点が乗るはずだが、この結果が示すように、正面付近では非常に精度が悪く、また値のばらつきも大きく安定しない。

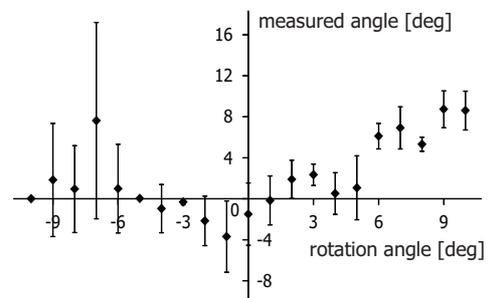


図 16 Measurement result of ARToolKitPlus marker

5.2.3 RAS ユニットの測定結果

図 17 に結果を示す。ここでは、視線角度に変換する前の黒ピーク位置 (0 - 480) の測定値をプロットした (現時点で得られるレンチキュラーレンズのスペック情報では角度への正確な変換モデルを作り難いため、4.3 参照)。各点には同様にエラーバーを付けてあるが、非常に幅が小さいため目立たない。この結果から読み取れるように、RAS ユニットでは回転角 (\approx 視線角度) の変化に対して黒ピーク位置の変化が連続的かつ安定して取得できている。データの標準偏差は、概算で角度に変換すると 0.2-0.4deg である。マーカと正対している状態でも 1deg 未満の回転角の変化を黒ピーク位置の変化として検出可能であることが分かる。今後、黒ピーク位置から視線角度への正確な変換モデルが得られれば、視線角度の「変化」の検出だけでなく、視線角度そのものの精密な測定が可能になると考える。

5.2.4 実測値と簡易モデルとの比較

4.3 において、観測した黒ピーク位置 p から視線角度 θ を導く簡易モデルを構築したが、そのモデルの適合性を実測値との比較で検証する。

モデルから視線角度を計算するために必要な x_a, x_b, d_a, d_b を定めるため (式 (23) 参照)、RAS ユニット

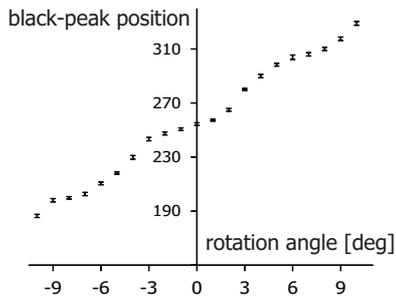


図 17 Measurement result of RAS marker

を実測して表 1 に示す (i)–(iv) の 4 点のデータを得た．このうち 2 点のデータをいくつかの組み合わせで用い，式 (23) によって視線角度を計算した結果が図 18 である．なお，ここで用いた RAS ユニットの長さは 12mm のものである．

表 1 Some Measurement Data for Calibration

point num.	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
d_*	29.5	99.22	127.68	166.2
x_*	292.49	270.87	268.59	261.10

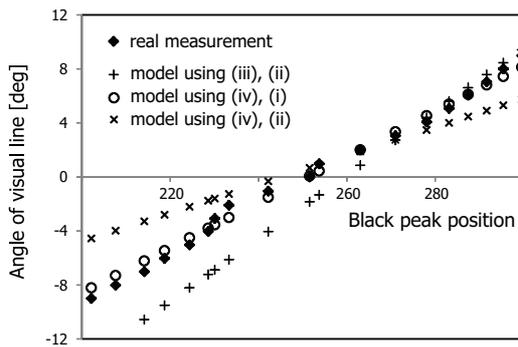


図 18 Comparison between real measurement and models

これらの結果から分かるように，どの 2 点からの観測値を d_*, x_* として用いるかによって，モデルと実測値の一致度が異なっている．この原因は，本モデルが 4.3 で設定した理想的な仮定 2) に基づいており，その条件に近い点のデータを使用したときは一致度が高くなるからだと考えられる．この考えによると，点 (iv) と点 (i) の組み合わせはこの条件に近く，そのときはモデルが実測値を良く近似でき，モデルのある程度の正しさが検証できたといえる．しかし，レンチキュラーレンズのスペック情報不足のため，判断できるのはここまでである．実際，実測値のほうは視線角度の変化に少し波が現れており．これは周期的パターンをもつレンチキュラーレンズ断面形状や回折光の影響もあると考えられ，より詳細なモデル構築のためには，正確な断面形状，屈折率，焦点距離等のスペックを知る必要がある．これらを考慮した詳細なモデル構築は今後の課題である．

5.2.5 距離や照明条件に対するロバスト性

距離や照明条件を変化させ，RAS マーカによる計測の安定性がどのように変化するか調べた．

距離による安定性（データの標準偏差で評価）の変化を図 19 に示す．RAS マーカについては，黒ピーク位置の標準偏差を，図 18 の関係から得た係数 (0.168[deg/pixel]) によって角度に変換して表示している（以下同じ）．

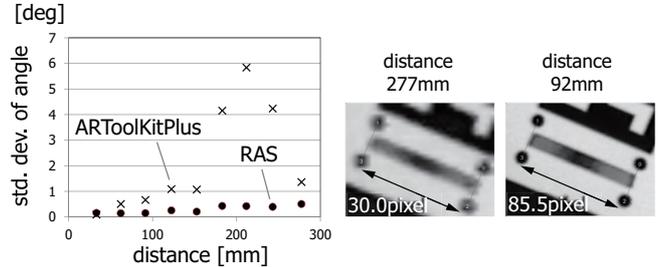


図 19 Variation of measurement stability according to distance

このように，従来のマーカと比べて RAS マーカの安定性は距離によって大きく変化せず，よりロバストな観測が可能であることが分かる．次に，照度を変化させたときの安定性の変化を図 20 (右下) に示す．照度についても，RAS マーカの安定性は大きく変化しない．ただし，同じ位置関係から観測しても，照度の変化により黒ピークの検出位置が少し変化した (case(1) と (4) の間で 1.8[deg] 相当)．これは，RAS ユニットに入射する環境光がレンチキュラーレンズの下の縞模様を照らし，パターンの見かけに影響を与えているからと考えられる (図 21 参照)．通常の照明条件下では深刻な問題ではないが，日中の屋外等，光が強く，その入射角度が変動する環境では対策が必要である．

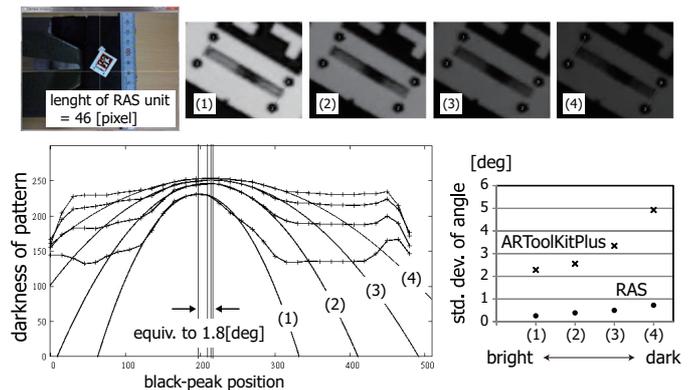


図 20 Variation of measurement stability according to lighting condition

対策の一つとして，光の強さの影響を受けやすいグレイ値ではなく，RGB や HSV 等，別のチャンネルの値を用いてピークを検出する，という手法が考えられる．ここでは図 22 のように，白黒の代わりに赤青を用いた縞模様によって RAS ユニットの形成し，RGB のうち B (青) の値のみを用いて「青ピーク」を検出する手法を試

みた．その結果，白黒縞模様とグレー値を用いてピーク検出していたときと比較して，光の入射によるピーク位置の変動の大きさを約半分に抑制できることを確認した．



図 21 Pattern variation by strong light

図 22 Blue and red pattern

6. ロボットタスクにおける RAS マーカの活用

RAS マーカを使うと，正面付近からでも安定かつ高精度に角度変化を検知できることが確認できた．本章では，この RAS マーカのロボットタスクへの応用例を示し，その有用性を実証する．

6.1 リファレンスタスク

車椅子に装着された生活支援ロボットアームによる冷蔵庫の扉あけタスクを行う．アームの手先には小型カメラを装着し，冷蔵庫の扉には視覚マーカの付いたハンドルを付けてある（図 23 参照）．手先カメラがマーカを認識した後，自律でマーカの位置・姿勢を基準とした所定のアーム軌道を生成することで扉を開ける．



図 23 Autonomous door handling using visual marker

6.2 RAS マーカを使わないときの作業可能範囲

過去に開発されたシステム [3] では視覚マーカとして ARToolKitPlus マーカを利用していたが，図 16 で示したように正面付近での姿勢精度が悪かったため，位置情報は用いても姿勢（角度）情報は用いなかった．運用上は，

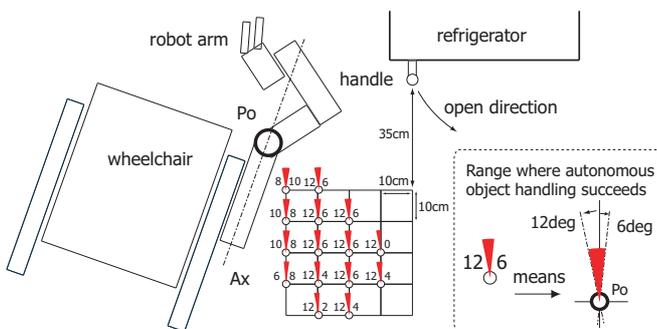


図 24 Range of pose where robot can open refrigerator without using RAS marker

マーカと正対する姿勢で車椅子を位置決めし，その車椅子座標で手先の方向を正面に指定することで「マーカとハンドは正対しているもの」という前提で軌道を生成していた．そのため扉開け動作の成否は車椅子の初期位置と姿勢に依存しており，タスクを成功させるためには車椅子の位置姿勢を図 24 の範囲内にする必要があり，実用上の大きな制約になっていた．

6.3 RAS マーカを使ったときの作業可能範囲

RAS マーカの角度変化検知能力を活かして軌道生成の前に自動でマーカに対するハンドの位置決めを行い，車椅子の初期位置姿勢に関わらずに扉を開けられるシステムを構築した．姿勢の調整は，地面に垂直な軸（マーカの y 軸）周りのみを行った（ハンドはあらかじめ地面に対して水平にしている）．アームの位置決めは下記のように非常にシンプルな制御則に基づいて行った（図 25）．

(1) RAS マーカの使用環境において位置決め完了時の位置・姿勢における RAS ユニットの黒ピークの値 p_{goal} を記録しておく．そのときのマーカとハンドの距離を d_{goal} とする．なお，距離の測定は ARToolKitPlus マーカを利用する．

(2) マーカとの相対位置データを利用し，マーカとの距離が d_{goal} ，かつハンドの中心軸がマーカの中心を通るようにハンドの位置と姿勢（マーカの y 軸周りの角度）を修正する．

(3) 上記 (2) の位置関係を保ちつつ，現在の RAS ユニットの黒ピーク位置 p_{pcnt} と p_{goal} の差の正負に応じてハンドの姿勢（マーカの y 軸周りの角度）を $\pm 2[\text{deg}]$ ずつ修正する．

(4) $|p_{pcnt} - p_{goal}| < 9$ (視線角度の $\pm 1.5[\text{deg}]$ に相当) となるまで (3) を繰り返す．

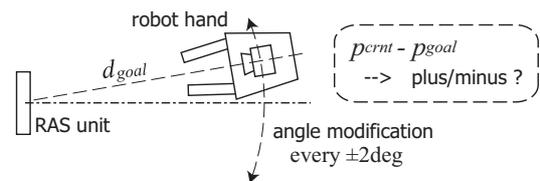


図 25 Angle modification by simple visual feedback

この制御アルゴリズムは RAS マーカから具体的な角度情報の抽出は行わず，黒ピークが所定の位置に見えるようにリアクティブなビジュアルフィードバック制御を行うというシンプルなものである．しかし実用上の性能は十分であった．実際，20 パターンの初期位置（RAS ユニットの正しくできる位置姿勢）から試行した結果，1-8 回の位置修正を繰り返すことで $2[\text{deg}]$ 以内の精度でマーカに対するハンドの位置決めをすることができた（失敗はなし）．これにより，車椅子の初期姿勢がどうであっても対象物体の姿勢に合わせた操作が可能となり，タスクが成功する車椅子の位置姿勢範囲は図 26 のように拡

大した。車椅子の「位置」の範囲拡大については、RAS マーカを使う前の時点からアームの軌道を少し変えたことも影響しているが、「姿勢」の範囲拡大は直接的に RAS マーカの効果である。

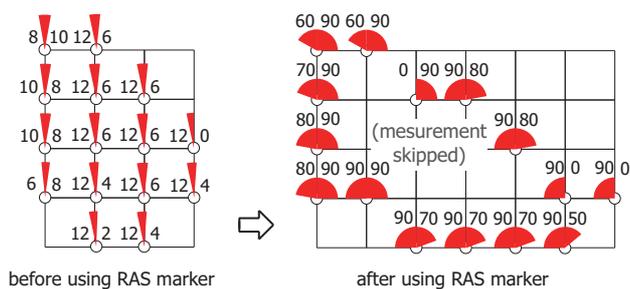


図 26 Range of pose where robot can open refrigerator: Comparison between before and after using RAS marker

本マーカを用いることで、従来の視覚マーカでは難しかった正面付近での正確な位置合わせが可能になり、その結果ロボットの作業適用範囲を拡大し、ロボットの能力を十分活用することができるようになった。この例により、本マーカが実アプリケーションで有用であることを示すことができた。

7. まとめと今後の展望

本研究では、新しい原理に基づき、正面付近からの観測でも視線角度を安定かつ高精度に検出可能な平面視覚マーカ（RAS マーカ）を開発した。また、そのための画像処理および計算アルゴリズムを開発した。本マーカの試作品を用いた性能検証を行い、従来の視覚マーカを上回る性能と実用性をもつことを明らかにした。また、RAS マーカをロボットハンドの位置合わせタスクに応用することで、その有用性を示した。

今後の課題は、まず本 RAS マーカから視線角度を計測するための正確なモデルの構築である。そのためにはレンチキュラーレンズの詳細なスペックを知る必要がある。また、本マーカの性能と適用範囲についてのさらに網羅的な検証実験を行う。それらの知見を活用し、より実用的かつ高性能なマーカの設計・開発につなげていく予定である。

最期に、今後計画している RAS マーカの発展版の例を示す。一つは「複数マーカの情報融合」である（図 27）。一つの RAS ユニットにより観測視点の存在する平面が定まるので、複数の RAS ユニットの情報を融合することで距離を測定したり、視点の位置を一意に定めることが可能となる。もう一つは「RAS ユニットの 2 次元化」である。図 28 に示すように、レンズアレイと、それよりも少し広いピッチをもつドットのパターンを組み合わせると、1 次元の RAS と同様の原理により、黒ピーク位置から 2 次元の視線角度 (θ , φ) が求められる。こうした RAS の開発も今後の課題である。

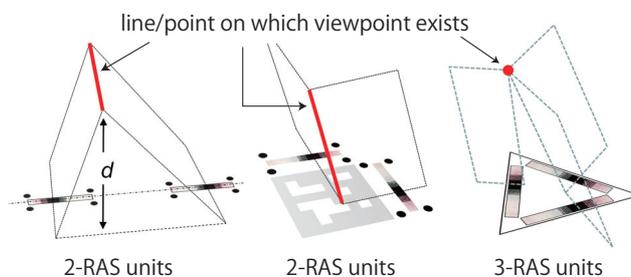


図 27 Information fusion of multiple RAS units

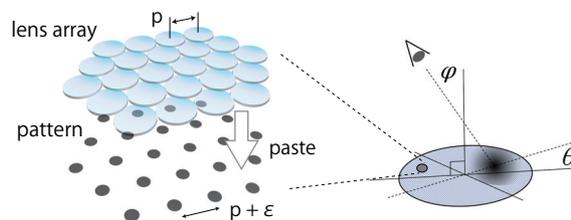


図 28 2-D RAS unit

本研究は科学研究費補助金（22700208）の助成を受けたものである。

文 献

- [1] J.Ota, et al., “Environmental support method for mobile robots using visual marks with memory storage”, in *Proc. 1999 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, vol.4, pp.2976–2981, 1999.
- [2] K.Ohara, et al., “Visual Mark for Robot Manipulation and Its RT-Middleware Component”, *Advanced Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 633–655, 2008.
- [3] H.Tanaka et al., “Visual Marker System for Control of Flexible Manipulator Supporting Daily Living”, in *Proc. ICROS-SICE Intl. Joint Conf. 2009*, pp.1666–1670, 2009.
- [4] Y.Uematsu and H.Saito, “Improvement of Accuracy for 2D Marker-Based Tracking Using Particle Filter”, in *Proc. 17th Intl. Conf. Artificial Reality and Telexistence 2007*, pp.183–189, 2007.
- [5] D.Abawi, J. Bienwald and R.Dörner, “Accuracy in Optical Tracking with Fiducial Markers: An Accuracy Function for ARToolKit”, in *Proc. the Third IEEE and ACM Intl. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, pp.260–261, 2004.
- [6] K.Pentenrieder, et al., “Analysis of tracking accuracy for single-camera square-marker-based tracking”, in *Proc. Driter Workshop Virtuelle und Erweiterte Realitt der GIFachgruppe VR/AR*, Koblenz, Germany, 2006.
- [7] M.Fiala, “ARTag Fiducial Marker System Applied to Vision Based Spacecraft Docking”, in *Proc. Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2005 Workshop on Robot Vision for Space Applications*, pp.35–40, 2005.
- [8] QRcode Web Site, “<http://www.denso-wave.com/qrcode/index-e.html>”
- [9] H.Kato, “Inside ARToolKit”, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/Papers/ART02-Tutorial.pdf>
- [10] M.Rubio, et al., “Jittering Reduction in Marker-Based Augmented Reality Systems”, in *Proc. ICCSA (1), 2006*, pp.510-517, 2006.
- [11] D.Wagner and D.Schmalstieg, “ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices”, *Proc. 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW'07)*, 2007.