

B2-2 MOVIS による全周環境認識および自己位置同定に関する研究

福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻 進化ロボット研究室

井戸 大介 (指導教官：前田 陽一郎)

1 緒言

近年、複雑な環境下において適応的に行動する自律移動ロボットに関する研究が盛んに行われている。中でも、周囲の環境を認識し現在のロボット自身の絶対位置を把握する自己位置同定は、状況に応じた行動計画を立てるためには最も重要な要素の一つである。しかしながら、搭載センサのみによる実時間での高精度な絶対位置計測は困難であるため、自律移動ロボットに関する研究においては重要な研究課題の一つになっている。

全周の環境を一度に取り込むことのできるビジョンセンサに、全方位ビジョンがある。しかし、全方位ビジョンは物体までの方位は正確に計測することができる反面、距離は高さが既知の物体でなければ計測できない [1, 2]。

これに対し本研究室では3つの全方位ビジョンを水平に正三角形状に配置したマルチ全方位ビジョンシステム (Multiple Omnidirectional Vision System: MOVIS) を提案している [3-7]。MOVIS は 360 度全周にわたり計測物体の距離と方位を比較的精度よく計測することが可能である。しかし、全方位ビジョンの画像を同時に3枚取得するため、処理能力の低いコンピュータで複雑な画像処理を行うとリアルタイム性を損ねてしまう可能性がある。また、全方位ビジョンを3台使用するハードウェアの複雑さから計測誤差が生じやすいという問題ももっている。

そこで本研究では、まず誤差の生じにくい高精度のハードウェアを製作し、処理能力の低いコンピュータでもリアルタイムに全周にわたる距離計測が行えるよう、比較的簡易な画像処理で全周の物体認識ができるアルゴリズムを提案する。次に、認識した物体位置を計測する手法を示す。また、誤差の生じにくいハードウェアを製作しても完全に誤差を取り除くことは容易ではないため、MOVIS に適した計測誤差補正手法を提案する。さらに、計測誤差補正手法を適用した MOVIS による自己位置同定実験も行ったので、併せて報告する [8, 9]。

2 MOVIS の概要

MOVIS において、全方位カメラを3台使用し、それぞれ M_1 、 M_2 、 M_3 とする。図1に示すように、移動ロボット上に床面と水平に正三角形状に配置する。このとき、ロボットの重心と3台の全方位ビジョンが作る正三角形の重心は垂直方向に対し同一点に存在す

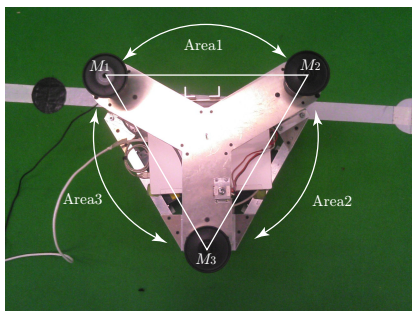


図1: MOVIS の概観

る。正三角形の重心より各頂点を延長した境界線により、カメラの画像取得範囲を 120 度ずつ 3 等分した領域に分割し、各領域をそれぞれ 2 台のカメラ対 (図1の場合、 M_1 と M_2 、 M_2 と M_3 、 M_3 と M_1) を用いて各カメラの相対角度のみによる三角測量により距離計測を行なう。

3 MOVIS による全周環境認識手法

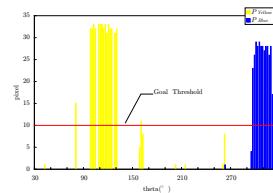
本研究で用いた全方位ビジョン (SOIOS-55Cam : 末陰産業製) は YUV422 という表色系で 320×240 pixel (QVGA) の画像を 30FPS で取得できる。また YUV411 という表色系では 640×480 pixel (VGA) の画像を同じく 30FPS で取得できる。そこで本研究では、YUV411 で VGA (640×480 pixel) の画像 (x, y) を取得し、Y, U, V それぞれに色を抽出するための上限値 $T_{\max}$ と下限値 $T_{\min}$ (閾値) を設け、2 値化する。今回抽出する色はオレンジ色、青色、黄色の三色である。

全方位ビジョンが取得する画像は VGA であるが、実際の環境情報はミラー上にしか存在しない。また、MOVIS は計測対象物体までの相対角度のみを用いて位置計測を行う。そこで以降の処理を容易にするため、画像上の座標 (x, y) を双曲面ミラーの中心 $O(O_x, O_y)$ を基準とする以下のような極座標系 (θ, r) に変換する。

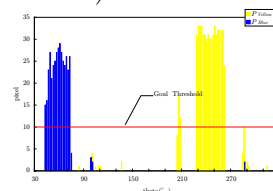
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y - O_y}{x - O_x} \right) \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x - O_x)^2 + (y - O_y)^2} \quad (2)$$

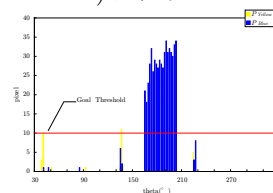
ここで全方位カメラのハードウェア拘束によりミラー



a) カメラ 1

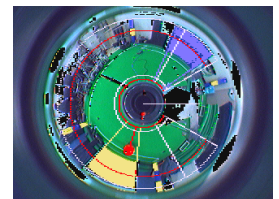


b) カメラ 2

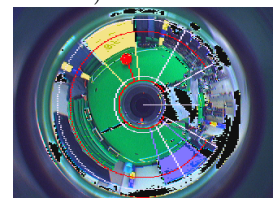


c) カメラ 3

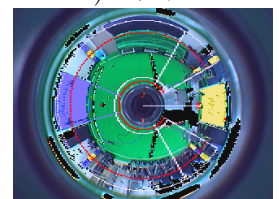
図2: 色ピクセル数
カウント値



a) カメラ 1



b) カメラ 2



c) カメラ 3

図3: 物体を認識
している様子

の中心にはカメラ自身が、また MOVIS のハードウェア拘束により、極座標系における $-30^\circ \leq \theta < 30^\circ$ 上の画像にはロボット本体が写りこんでいるため計測には必要ない部分となる。そこで、極座標系において $30^\circ \leq \theta < 330^\circ, r_{\min} \leq r < r_{\max}$ ($r_{\min}$: カメラの画像上の半径, $r_{\max}$: ミラーの画像上の半径) に対して式 (1), (2) を適用し、全方位画像を極座標系に変換する。ここで式 (3), (4) を用いて θ に対して r 方向に注目している色 (今回はランドマークであるゴールの色: 黄色, 青色) のピクセル数 P をカウントすることにより、図 2 のような簡易的な全周の色ピクセル数カウント値が得られる (対応画像は図 3 参照)。図 2 のように各色ピクセル数カウント値を視野角全域に対して棒グラフとしてプロットしたヒストグラムにおいて、環境を認識するための閾値を設けることにより、閾値を超えた色ピクセルの領域角度の中心をその対象物体の代表方位と考え、直接各カメラの方位角 θ_n (n = カメラ番号) を得ることができる。

$$P_{Yellow_\theta} = \sum_{r=r_{\min}}^{r_{\max}} 1 \quad \text{if } Color(\theta, r) = Yellow \quad (3)$$

$$P_{Blue_\theta} = \sum_{r=r_{\min}}^{r_{\max}} 1 \quad \text{if } Color(\theta, r) = Blue \quad (4)$$

4 MOVIS による物体位置計測手法

図 4 において位置計測は計測物体 $A(x'_a, y'_a)$ を全方位ビジョン M_1, M_2 を用いて三角測量を行い、物体位置をロボット重心を中心とした座標系で求めることを考える。 x 軸に水平にある $\overline{M_1 M_2}$ に対し、 M_1 における物体 A の傾きは $(\theta_1 - \frac{\pi}{6})$ 、 M_2 における物体 A の傾きは $(\theta_2 - \frac{5\pi}{6})$ であり、ロボットの重心からビジョンまでの距離を L とする。ビジョン M_1, M_2 の中心座標は既知であるため、ロボット座標系における物体 A の位置 (x'_a, y'_a) は、(5), (6) 式で求められる。

$$x'_a = \frac{\sqrt{3}}{2} L \cdot \frac{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) + \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (5)$$

$$y'_a = \frac{1}{2} L + \sqrt{3} L \cdot \frac{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) \cdot \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (6)$$

カメラ M_2 と M_3 、 M_3 と M_1 に対しても同様の処理を行う。ここで、カメラ M_2 と M_3 による計測領域 (エリア 2)、カメラ M_3 と M_1 による計測領域 (エリア 3) はそれぞれロボット座標系において $-\frac{2\pi}{3}$ 、 $-\frac{4\pi}{3}$ 傾いている。そこでエリア 2 での計測結果には $-\frac{2\pi}{3}$ 、エリア

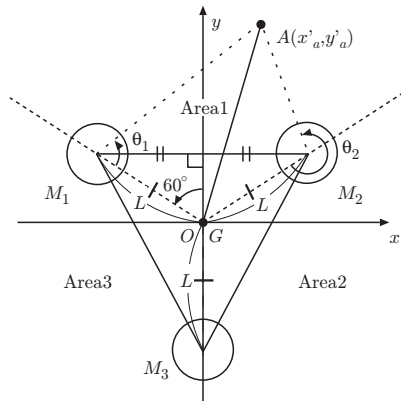


図 4: MOVIS における物体位置計測

3 の計測結果には $-\frac{4\pi}{3}$ の座標軸回転を行い、全周にわたるロボット座標系における位置計測を行う。

5 MOVIS における計測誤差補正手法

全方位ビジョンのハードウェア上に起こる様々な誤差を個別にキャリブレーションするのは極めて困難である。そこで、ロボット座標系における物体位置が既知である物体を計測し、誤差を逆補正することにより、簡易的に計測誤差を補正する。図 5 に示すような実験装置を用い、精度のよい計測実験を行う。ロボット座標系における計測物体の直交座標 $A(x_a, y_a)$ を極座標 $A(d_a, \phi_a)$ に変換し、 $d_{a_j} = \{50\text{cm}, 100\text{cm}, \dots, 500\text{cm}\}$, $\phi_{a_i} = \{0^\circ, 20^\circ, \dots, 340^\circ\}$ の全ての組み合わせの計 180 点において θ_{nij} (i = 方位, j = 距離) を計測する。次に計測点に対応する理想的な物体位置 $A'_{ij}(x'_{a_{ij}}, y'_{a_{ij}})$ を算出する。式 (5), (6) より、理想的な各カメラの θ'_{nij} は、

$$\theta'_{1ij} = \tan^{-1} \left(\frac{y'_{a_{ij}} - \frac{L}{2}}{x'_{a_{ij}} + \frac{\sqrt{3}L}{2}} \right) + \frac{\pi}{6} \quad (7)$$

$$\theta'_{2ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{L}{2} - y'_{a_{ij}}}{\frac{\sqrt{3}L}{2} - x'_{a_{ij}}} \right) + \frac{5\pi}{6} \quad (8)$$

で求められる。得られた θ'_{nij} から以下のように誤差 $\delta\theta'_{nij}$ を求める。

$$\delta\theta'_{nij} = \theta'_{nij} - \theta_{nij} \quad (9)$$

この誤差を、ロボット重心からの方位に対する各カメラの方位角 θ'_{nj} およびロボットからの距離 j に対して平均を取り、グラフにプロットする。このグラフでは計測点 (代表点) における誤差のみなので、計測点間を補完するため 3 次関数で最小二乗近似し、誤差の近似曲線を得る。得られた誤差の近似曲線を基に、誤差マップ $\delta\theta_n$ を生成する。計測結果を基に誤差マップから角度誤差を推定し、誤差補正後の角度 θ''_n を得る。補正後の物体位置 $A''(x''_a, y''_a)$ は、以下の式で表せる。

$$x''_a = \frac{\sqrt{3}}{2} L \cdot \frac{\tan(\theta''_2 - \frac{5\pi}{6}) + \tan(\theta''_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta''_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta''_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (10)$$

$$y''_a = \frac{1}{2} L + \sqrt{3} L \cdot \frac{\tan(\theta''_2 - \frac{5\pi}{6}) \cdot \tan(\theta''_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta''_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta''_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (11)$$

ここで $\theta''_1 = \theta_1 + \delta\theta_1$, $\theta''_2 = \theta_2 + \delta\theta_2$

6 MOVIS による自己位置同定手法

自律移動ロボットが実環境の中で行動するとき、ロボット周囲の環境は絶えず変化し、今まで見えていたランドマークが突然見えなくなるケースも多々ある。そこで、複数の自己位置同定手法から現在認識しているランドマークに適した手法を使い分け、その出力結果の統合によりロボットの自己位置同定を行なう手法を提案する。本手法の説明を行なうため、筆者が実験環境として用いたサッカーフィールドを例題とした。ここでは黄色と青色のゴールの両端エッジおよび中心位置をランドマークとして使用した。また、自己位置同定手法には以下の 3 つの手法を提案する。いずれの手法もフィールドの中心を原点とし、黄色ゴール方向を Y 軸正方向、Y 軸に直行する方向を X 軸方向とした絶対座標系にて自己位置同定を行う。

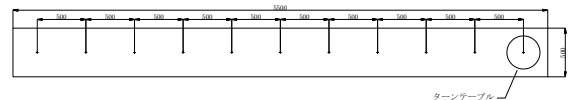


図 5: 実験装置 (上から見た図)

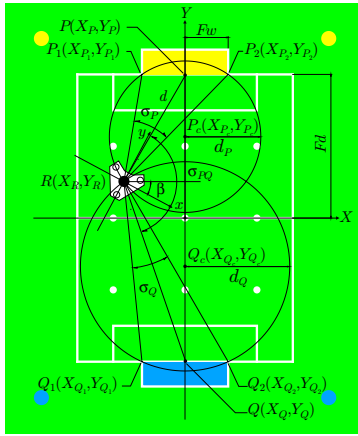


図 6: 自己位置同定手法

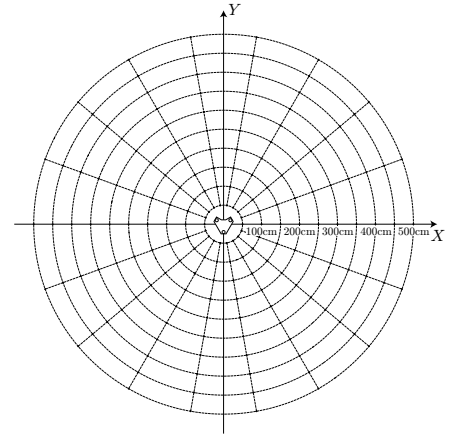


図 7: 計測実験環境

[手法 1] 2 つのランドマークの絶対座標と相対座標を用いた同次変換による手法

[手法 2] 2 つのランドマークの相対角度とどちらか一方への相対距離を用いた手法

[手法 3] 2 つのランドマークとロボットが成す三角形の外接円の交点を用いた手法

図 6 において自己位置 $R(X_R, Y_R)$ は、手法 1 において (12), (13) 式、手法 2 において (15), (16) 式、手法 3 において (18) ~ (19) 式で計算できる。

$$X_R = \sin \beta y_p - \cos \beta x_p \quad (12)$$

$$Y_R = Fd - \sin \beta x_p - \cos \beta y_p \quad (13)$$

ここで、

$$\beta = \tan^{-1} \frac{x_p - x_q}{y_p - y_q} \quad (14)$$

$$X_R = d \sin \left(\pi - \left(\sigma_{PQ} + \sin^{-1} \left(\frac{d \sin \sigma_{PQ}}{2Fd} \right) \right) \right) \quad (15)$$

$$Y_R = Fd - d \cos \left(\pi - \left(\sigma_{PQ} + \sin^{-1} \left(\frac{d \sin \sigma_{PQ}}{2Fd} \right) \right) \right) \quad (16)$$

$$X_R = +\sqrt{r_P^2 - (Y_R - Y_{P_C})^2} \quad (17)$$

$$(x_{P_1}^2 + y_{P_1}^2 < x_{P_2}^2 + y_{P_2}^2)$$

$$X_R = -\sqrt{r_P^2 - (Y_R - Y_{P_C})^2} \quad (18)$$

$$(x_{P_1}^2 + y_{P_1}^2 > x_{P_2}^2 + y_{P_2}^2)$$

$$Y_R = \frac{(r_P^2 - Y_{P_C}^2) - (r_Q^2 - Y_{Q_C}^2)}{2 \cdot (Y_{Q_C} - Y_{P_C})} \quad (19)$$

7 実験

提案手法の有効性を検証するため、物体位置計測実験、計測誤差補正実験および自己位置同定実験を行った。以下では実験方法と結果について説明する。

7.1 物体位置計測実験

MOVIS の基礎性能を評価するため、計測誤差の補正を行わない物体位置計測実験を行った。計測対象物体として、RoboCup 中型ロボットリーグ準拠のオレンジ色のサッカーボール (5 号球, 直径 22cm) を使用した。実験に使用した機器を表 1 に示す。

太陽光などの外乱で計測に影響を与えないよう光量を一定に保つことのできる室内で、ロボット座標系において相対距離 500cm まで 50cm 間隔、相対角度を 20 度分割、計 180 ポイントに計測対象物体を設置し実験を行った (図 7 参照)。

実験結果を図 10 に示す。全周にわたり比較的精度のよい計測結果が得られたが、部分的に誤差が生じた。また、その誤差は距離に比例しており、ある程度傾向が見られた。

表 1: 実験に用いた機器

パソコン	パソコン工房 “LESANCE CL206GW”
CPU	Celeron M350 1.4GHz
メモリ	512MB
全方位ビジョン解像度	末影産業 “SOIOS55-Cam” 640 × 480 (VBA)
フレームレート	15fps

7.2 計測誤差補正実験

前節で示した計測誤差より各カメラにおける誤差マップ (計測対象物体への理想的な相対角度と実際の相対角度との差を表示したもの) を作成し、計測結果を逆補正することを試みた。各カメラの計測誤差は図 11 に示す (紙面の都合上、カメラ 1, 2 のみ示す)。

実験結果を図 12 に示す。誤差補正前と比べ、方位誤差は最大、最小とも下回ることができ、距離誤差については平均で約 14 %、最大で約 326 %もの精度向上ができた。

7.3 自己位置同定実験

計測誤差補正手法を用いた MOVIS の高精度物体位置計測能力を生かした自己位置同定実験を行った。図 8 に示すようなロボットを用いて、図 9 に示すような、長さ 400cm × 幅 350cm のサッカーフィールドを環境として使用した。この自律移動ロボットは筆者らの研究室で開発したサッカーロボットであり、低重心設計で全方向移動機構を有している。配色は RoboCup 中



図 8: 自律移動ロボット

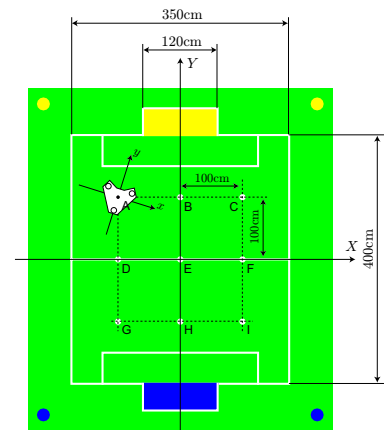


図 9: 自己位置同定実験環境

型ロボットリーグに準拠し、ゴールの色は黄色と青色、フィールドはグリーンとした。フィールドの中央を絶対座標系の原点とし、黄色ゴール方向を Y 軸正方向、Y 軸と直行する軸を X 軸として、A から I 地点の計 9 ポイントを計測ポイントとして設定した。各計測ポイントに図 5 に示したターンテーブルを設置し、MOVIS を搭載した自律移動ロボットを乗せ 360 度を 20 度毎に分割した 18 方向、計 162 回の自己位置同定実験を行った。

実験結果の一部 (絶対座標系に対するロボットの傾き角 $\beta = 0$ のとき) を図 13 に示す。誤差の絶対値の平均は、X 軸方向 8.5cm、Y 軸方向 13.0cm、 β おいては 2.8 度と、比較的精度のよい結果が得られた。

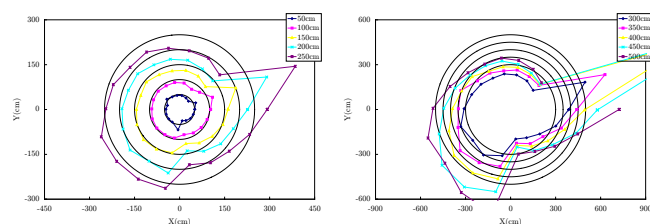
8 結 言

本研究では、3 台の全方位ビジョンを水平に正三角形状に配置したマルチ全方位ビジョンシステム (Multiple Omnidirectional Vision System: MOVIS) を構築し、効率的な全周環境認識手法、物体位置計測手法、計測誤差補正手法および自己位置同定手法を提案した。検証実験により、全周の環境をリアルタイムに認識し、比較的精度のよい計測が可能であることを確認した。また、ある程度の精度で MOVIS を搭載した自律移動ロボットの自己位置を同定できることも確認した。

今後の課題としては、MOVIS の性能をさらに向上するために、環境に存在する複数類似物体のラベリングとステレオ視のための対応付け、全周にわたって計測誤差を精度よく補正できる新たな計測誤差補正手法の検討、より多くのランドマーク情報を用いたロバーストな自己位置同定手法の考案等が必要であると考えられる。また、MOVIS は汎用的な全周環境認識センサとして一般の自律移動ロボットや監視システム等への応用も期待できる。今後は様々な分野に MOVIS を応用することも重要な課題であると考えられる。

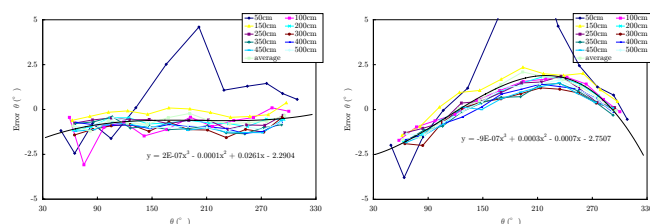
参考文献

- [1] 知原伸悟, 川端邦明, 浅間一, 三島健稔: “全方位視覚センサによる移動ロボットの自己位置推定,” 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 3A25 (2002)
- [2] 関森大介, 臼井智也, 升谷保博, 宮崎文夫: “全方位視覚画像のラベリングに基づく移動ロボットの高速な障害物回避,” 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, Vol.3, pp.995-996 (2000)
- [3] W.Shimizuhiro and Y.Maeda: “Self-Localization Method Used Multiple Omnidirectional Vision System,” *SICE Annual Conference 2003*, CD-ROM, pp.2796-2799 (2003)
- [4] 清水平彦, 前田陽一郎: “マルチ全方位ビジョン MOVIS を用いた物体位置計測および自己位置同定手法,” 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 3K1a (2003)
- [5] 清水平彦, 藤井恭子, 前田陽一郎: “マルチ全方位ビジョン MOVIS を搭載したサッカーロボットの階層型ファジィ行動制御,” 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2F16 (2004)
- [6] W.Shimizuhiro, K.Fujii and Y.Maeda: “Fuzzy Behavior Control for Autonomous Mobile Robot in Dynamic Environment with Multiple Omnidirectional Vision System,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, CD-ROM, SA2-M3 (2004)
- [7] W.Shimizuhiro and Y.Maeda: “Behavior Control Method by Multi-Layered Fuzzy Rule for Autonomous Mobile Robot with Multiple Omnidirectional Vision System,” *The Fourth International Symposium on Human and Artificial Intelligence Systems (HART 2004)*, pp.283-288 (2004)
- [8] 井戸大介, 清水平彦, 前田陽一郎: “MOVIS を搭載した自律移動ロボットによる物体位置計測および誤差補正手法,” 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 1B15 (2005)
- [9] 井戸大介, 前田陽一郎: “MOVIS による物体認識および動的自己位置同定手法,” 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 1B22 (2006)



a) 50cm ~ 250cm b) 300cm ~ 500cm

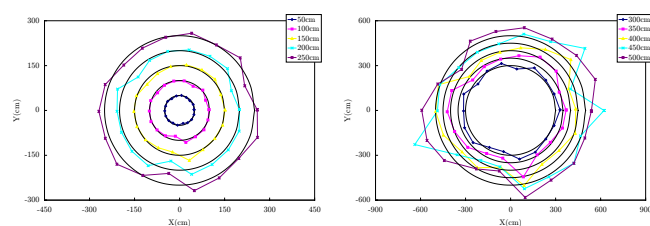
図 10: 物体位置計測実験結果



a) カメラ 1

b) カメラ 2

図 11: 各カメラの計測誤差



a) 50cm ~ 250cm

a) 300cm ~ 500cm

図 12: 計測誤差補正実験結果

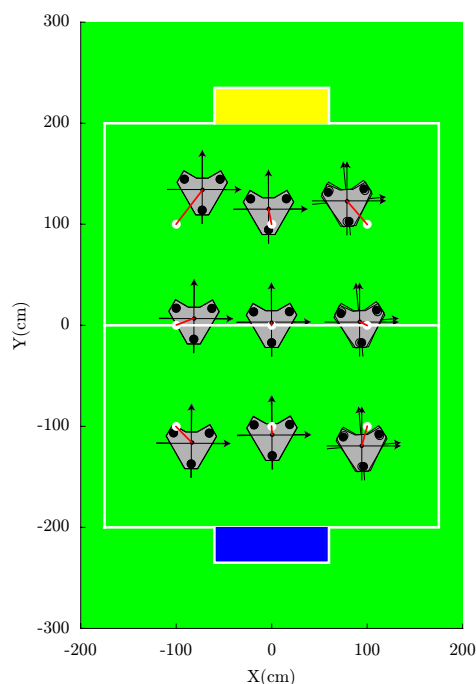


図 13: 自己位置同定実験結果