

カメラ特性を考慮した複数自律移動ロボットのための 環境・計測シミュレータの開発

梅田和昇^{*1} 浅沼和範^{*2} 菊地敏文^{*2}
上田隆一^{*3} 大隅久^{*1} 新井民夫^{*3}

Development of a Simulator of Environment and Measurement for Multiple Autonomous Mobile Robots Considering Camera Characteristics

Kazunori Umeda^{*1}, Kazunori Asanuma^{*2}, Toshifumi Kikuchi^{*2},
Ryuichi Ueda^{*3}, Hisashi Osumi^{*1} and Tamio Arai^{*3}

In this paper, a simulator of environment and measurement that considers camera characteristics is developed for multiple autonomous mobile robots. RoboCup 4-legged robot league is chosen as the concrete target. The simulator introduces a sever/client system, and realizes separation of each robot's information, introduction of each robot's difference and distribution of processes. OpenGL is utilized to produce virtual images. So as to make a simulator reflect real environment, sensing noises should be considered. The simulator considers the effects of blur, element noises, vignetting, lens distortion and delayed exposure for each line of the CMOS image sensor. Experiments show the similarity between actual camera images and simulated camera images. Consequently, it is possible to verify programs for multiple autonomous mobile robots on the simulator, and therefore the proposed simulator is a useful tool for effective development of algorithms.

Key Words: Simulator, Consideration of Camera Characteristics, RoboCup

1. はじめに

自律移動ロボットはセンシング、行動計画、協調動作など複数のタスクを実時間で同時に実行することが求められる。家庭やオフィスなどの生活環境のように動的な環境で作業を行う自律移動ロボットの開発をする場合、多くの環境を想定し、その環境における動作確認を行う必要がある。しかし、実機で多様な環境を作り出すには多くの労力を要する。そこで、PC上で環境やロボットのセンシングなどをシミュレートしその労力を削減するためにシミュレータが多く構築されている。自律移動ロボット用シミュレーションツールとしては、マイクロロボット Khepera 用に開発された“WEBOTS” [1] が研究や教育の現場で広く使用されている。例えば山田 [2] は、GA による行動学習を行うために WEBOTS を用いている。また井上 [3] も学習のためにシミュレータを利用し、センサデータとしては近接覚赤外線センサをシミュレートしている。また、代表的な移動

ロボットの一つである“山彦”に対し、複数台の自律移動ロボットのための動作プログラムシミュレータ [4]、超音波センサをモデル化したシミュレータ [5] が開発されている。ヒューマノイド用 [6]、4 足ロボット用 [7]、水中ロボット用 [8] などのシミュレータも開発されている。

本研究で対象として取り上げるロボカップ [9] [10] においても、いくつかのシミュレータの開発が行われてきた。松井ら [11] は、小型機部門のサッカーロボットの開発において、複数台のロボットの行動を同時に模擬できるシミュレータの構築を行っている。このシミュレータは、シミュレーション部門で使われているサッカーサーバ [12] の考え方を基に構築されている。また、藤原ら [13] は小・中型機部門のサッカーロボットの開発において、ロボットの協調行動を学習するためのシミュレータ開発を行っている。このシミュレータでは移動ロボットの視覚として前方のみ視覚情報を獲得できる局所視覚と、移動ロボットの周囲の情報を獲得できる全方位視覚との選択ができる。Chang ら [14] も同様のシミュレータを開発している。また、4 足ロボットリーグを対象としたシミュレータも開発されている [15] [16]。

以上に示したこれまでに構築されたシミュレータのいくつかでは、センシングのモデル化も行われている。しかしながら、センサのノイズや収差などの特性を考慮したものはほとんどない。実際のロボットのセンサではノイズや収差が必ず発生し、その

原稿受付 2004 年 10 月 20 日

^{*1}中央大学理工学部

^{*2}中央大学大学院理工学研究科

^{*3}東京大学大学院工学系研究科

^{*1}Faculty of Science and Engineering, Chuo University

^{*2}Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

^{*3}School of Engineering, The University of Tokyo

ためにロボットが予期した挙動を示さないことが多くあるので、より正確なシミュレーションを実現するにはこれらを陽に扱うことが必要不可欠であると言える。そこで本研究では、移動ロボットにとって重要なセンサ情報である画像情報に着目し、ノイズや収差などのカメラ特性を陽に考慮しながら、ロボットのセンシングと行動をシミュレートできるシミュレータを開発することを目的とする [17]。具体的な対象としては、Röfer ら [15]、Juan ら [16] と同様に、ロボカップ 4 足ロボットリーグを取り上げる。

2. ロボカップ—4 足ロボットリーグ—

2.1 リーグの概要

ロボットのための世界的な大会であるロボカップでは、自律移動ロボットの研究を 21 世紀の重要なテーマとしてとらえ、ロボットによるサッカー競技を通して技術の向上を目指している [9] [10]。本研究では、ロボカップ 4 足ロボットリーグを題材に自律移動ロボットのためのシミュレータ構築を行う。4 足ロボットリーグでは Fig. 1 に示す ERS-210 を共通のハードウェアとして用いる（現在はさらに新しい ERS-7 が主に利用されている）。

試合環境は Fig. 2 で示す 4,200 [mm] × 2,700 [mm] の大きさのサッカーフィールドであり、ロボットの自律的なサッカー行動を支援するためフィールド上の主要な物体は計 8 色の色で塗り分けられている。

各ロボットは完全自律で行動する。無線 LAN を用いたロボット間通信も許されているが、無線 LAN を有効に利用した協調戦略は他チームを含め確立されておらず、画像から他ロボットを画像処理で認識して戦略を組み立てることが行われている。

試合環境やルールは毎年更新され、公開されている [18]。

2.2 ロボットの概要

ERS-210 は、各足 3 関節、首 3 関節など計 20 自由度を持つ。

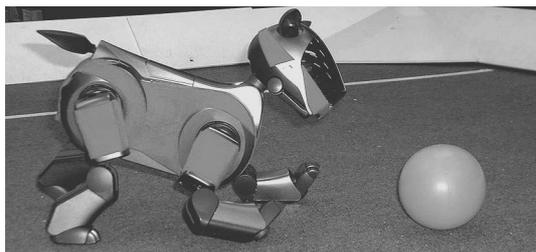


Fig. 1 ERS-210

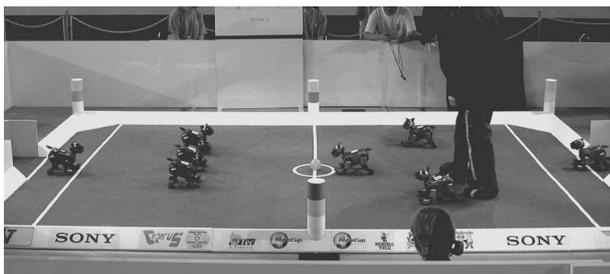


Fig. 2 Field of RoboCup 4-legged robot league

各関節角を一定のタイミング（歩行コマンドの周期）で事前に設定した値に更新することで、「前進、回転」などの歩行動作や、首振りや起き上がりなどの動作を実現している。各歩行コマンドは、ロボットに一定の距離と回転の移動量を与える。各歩行パターンでの移動量を事前にもとめておくことで、デッドレコニングでの自己位置更新が実現されている。

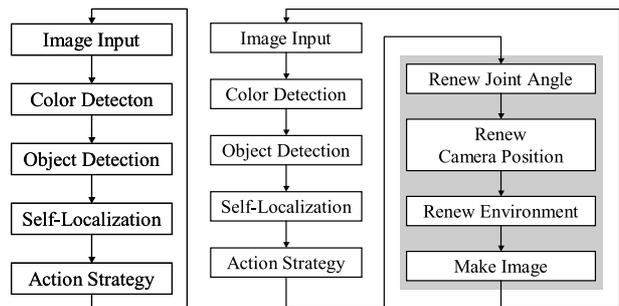
センサは、カラー CMOS カメラ、赤外線測距センサ、加速度センサ、タッチセンサなどを搭載している。ロボカップでは、これらのセンサのうち、頭部に搭載されたカラー CMOS カメラの入力のみを用いてサッカー行動が行われている。物体が色で塗り分けられていることを利用して、画像処理のほとんどは色情報を利用して行われている。

CPU は MIPS 系の 192 [MHz] のものが搭載され、メインメモリは 16 [MByte] の SDRAM である。画像は、3 階層の多重解像度フィルタを介してメインメモリに取り込まれ、さらに 8 チャンネルの色検出エンジン、内積エンジンを搭載している [19]。これらの機構系、センサ、CPU と処理エンジンを制御するソフトウェアは Aperios と呼ぶ SONY 独自のオブジェクト指向 OS の上に、OPEN-R と呼ぶインタフェース定義に従って開発されている [20]。

3. シミュレータの概要

本シミュレータに望まれることは、ロボカップ 4 足ロボットリーグにおいて、ロボットを動かすプログラムがシミュレータ上でも実ロボット上と同じ挙動をすることである（言い換えれば、シミュレータ上で実環境と同じようにサッカーの試合が行われることである）。まず、本シミュレータは、実機用のプログラムがそのまま実行できるように構築している。また、前章で述べたように、ロボカップ 4 足ロボットリーグでは、画像情報のみをセンサ入力としているため、実ロボットが取得する画像をシミュレートすることが重要である。そこで、本シミュレータではロボットがフィールド上の任意の位置・姿勢で取得する画像を正確に仮想生成することでセンサの出力の生成を可能とする。これにより、それに続くタスクを PC 上で実行しプログラムのデバッグやアルゴリズムの検証が行えるように設計している。画像入力周期において実機およびシミュレータが行う処理を Fig. 3 に示す。

シミュレータ上に構築した仮想フィールド環境の各物体は



(a) Real robot

(b) Simulator

Fig. 3 Task in image input cycle

OpenGL [21] によって正確な縮尺でモデリングされている (Fig. 4 参照). このフィールドの任意の位置に置かれたロボットは, その位置・姿勢, 首の関節角から求めたカメラ座標系を元に画像を作成する (Fig. 5 (a)). このとき, 実機が搭載している CMOS カメラの特性を考慮することで, 実機とシミュレータでロボットが取得する画像を近似させる (Fig. 5 (b)). ロボットは取得した画像を, 事前に設定したテーブルを基に八つの色に分ける (Fig. 5 (c)).

ロボットの動作に関しては, シミュレータ上ですべての関節角の動きを再現するのは困難で計算量も要する. そこでロボットの移動をフィールド二次元平面上での移動と回転のみとしている. 一方, 首の関節角は, カメラの姿勢に大きく関係するため, パン, チルト, ロール角の三つを指定できるようにしている.

ボールの動きに関しては, シュートを行った際に確率的にボールの移動距離を定め, その距離分ボールを移動させるということを行っている. また, 壁あるいはロボットとの衝突の際には, 反射面に対して正反射させている. 反射係数は経験的に 0.5 と定めている. 一方, ロボット自身の他のロボットや壁との衝突については, ロボットの形状を長方形に近似して衝突の判定を行い, 衝突したらそれ以上進まないという形で衝突を反映させている.

本研究では複数ロボットを対象としている. そこで, 実機の場合と同様に, 複数ロボットが同じ環境に存在し, また各ロボットの行動が相互に影響を与えるようにする必要がある. そこで,

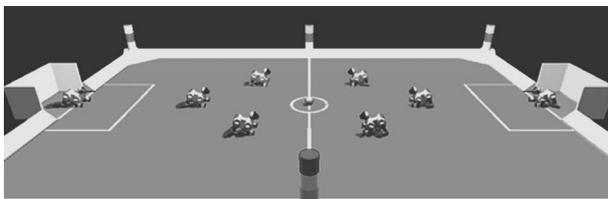
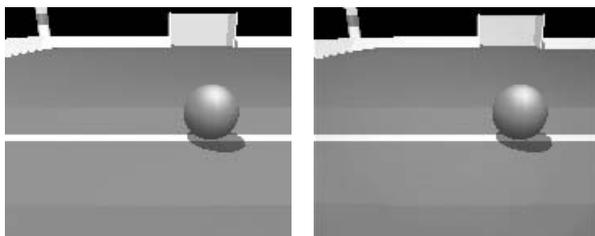
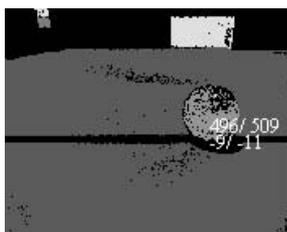


Fig. 4 Virtual field



(a) CG image

(b) CMOS image



(c) Color detected image

Fig. 5 Virtual image

本シミュレータではこれを実現するためにサーバ—クライアント方式を導入している.

4. サーバ—クライアント

サーバ—クライアント方式は, 一つのプロセスで処理するのではなく, クライアントとサーバの2種類のプロセスで分担して処理する方式である. 本システムではフィールド環境を管理するプログラムをサーバ, ロボットの行動を実行するプログラムをクライアントとした. このようにクライアントとサーバにプログラムを分けることの利点として次のようなことが容易に実現可能となる.

- (1) 各ロボットの情報の隔離
- (2) 処理の分散化
- (3) 各ロボットのプログラムの個別化

(1) により, ロボットが通信などの手続きを行わない限り他のロボットの情報を基本的には知ることができないという現実の条件を満たす. (2) により, サーバ—クライアント間を TCP/IP で接続することによってそれぞれのプログラムを別々の PC で実行することが可能となり, 計算処理の分散化が行える. (3) により, 個体ごとに敵味方・立場によって異なるプログラムや個体差を表現できる.

本シミュレータにおけるサーバ—クライアントシステムの全体構成を Fig. 6 に示す. クライアントでは画像作成, 画像解析, 行動戦略や動作などのロボットのセンシングや行動のシミュレートを行う. 一つのクライアントプログラムは1台のロボットの制御を担当する. 複数のクライアントプログラムを同時に起動し同じサーバにつなげることで複数のロボットを同一のフィールド内で動作させることができる. 一方サーバでは, 接続されたクライアントやボールの管理, 各種衝突判定などのフィール

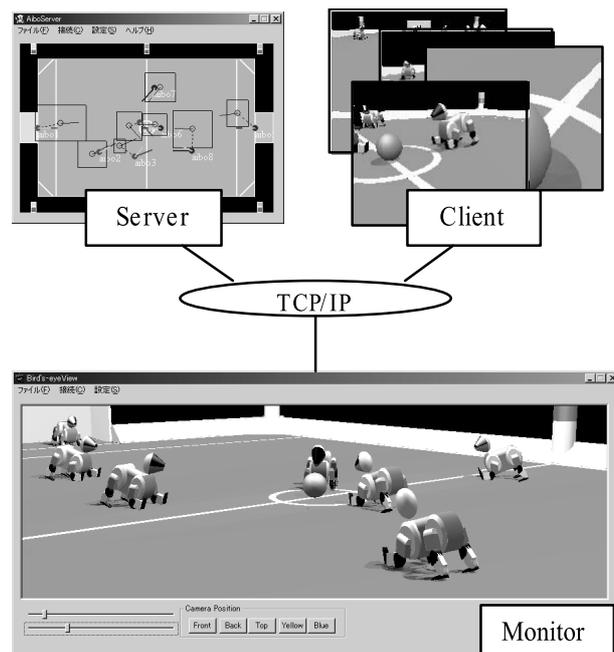


Fig. 6 Server client system

ド上の環境管理を行う。各クライアントはサーバを通してフィールド上の状況を知ることができる。サーバクライアント間では一定周期でお互いの情報を通信することでフィールド環境の整合性をとっている。また、Fig. 6 に示すモニタは、フィールド上の様子を俯瞰して見るためのツールである。

5. カメラ特性の付加

OpenGL で作成される画像は、Fig. 5 (a) で示したように理想的なピンホールカメラを想定している。そのため、実機の CMOS カメラで撮影される画像とは異なる。そこで、作成された画像をもとに、CMOS カメラの特性を付加し、実機で取得される画像を近似する。Table 1 に実機 ERS-210 のカメラのスペックを示す。

カメラの特性として以下のものを考慮する。

- (1) レンズ収差によるボケ
- (2) 素子ノイズ
- (3) レンズの歪曲収差
- (4) CMOS カメラのライン露光によるブレ

5.1 レンズ収差によるボケ

一般に、カメラレンズの収差によってその像はボケを生じる。収差には球面収差やコマ収差、色収差など複数のものが存在する。本シミュレータではこれら複合的な原因から画像にボケが生じることを考慮し、各画素へのボケが総合的にガウス分布に近似できると仮定して、シミュレータ画像にガウシアンフィルタを適用することを行った。ガウシアンフィルタは、二次元の画像 $f(u, v)$ に対して次に示す二次元のガウス関数

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

で表される。フィルタのサイズは 5×5 とした。また、ボケの大きさを表す標準偏差 σ の値は 1 とした。この値は実験的に適当に定めた。

以下、Fig. 7 にカメラ特性の付加の効果を示す。Fig. 7 (a) は実機で距離 1 [m] のボールを撮影した画像である。ゴールの幅は 600 [mm]、ボールの直径は 84 [mm] である。Fig. 7 (b) はシミュレータで同じ条件（ボール位置、ロボットの位置・姿勢など）のもと生成した画像である。Fig. 7 (c), (d) は Fig. 7 (a), (b) の画像をそれぞれ 4 倍に拡大したものである。Fig. 7 (d) にガウシアンフィルタを適用した画像を Fig. 7 (e) に示す。ボールのエッジでの不自然な凹凸が消えているのが分かる。

5.2 素子ノイズ

CMOS カメラでは、熱ノイズの混入やフォトダイオードの暗電流などによって各素子にランダムノイズが発生する。また、増幅

素子やスイッチングノイズなどで FPN (Fixed Pattern Noise) が発生する。各素子に対して事前にノイズの大きさ（標準偏差）を同一対象を多数回計測することで求め、シミュレータの画像の各素子に、事前に得られた値を標準偏差とするランダムノイズを付加する。ノイズの大きさは、素子ごとに異なるが、平均で 1.3 であった。Fig. 7 (f) にこのノイズを付加した画像を示す。

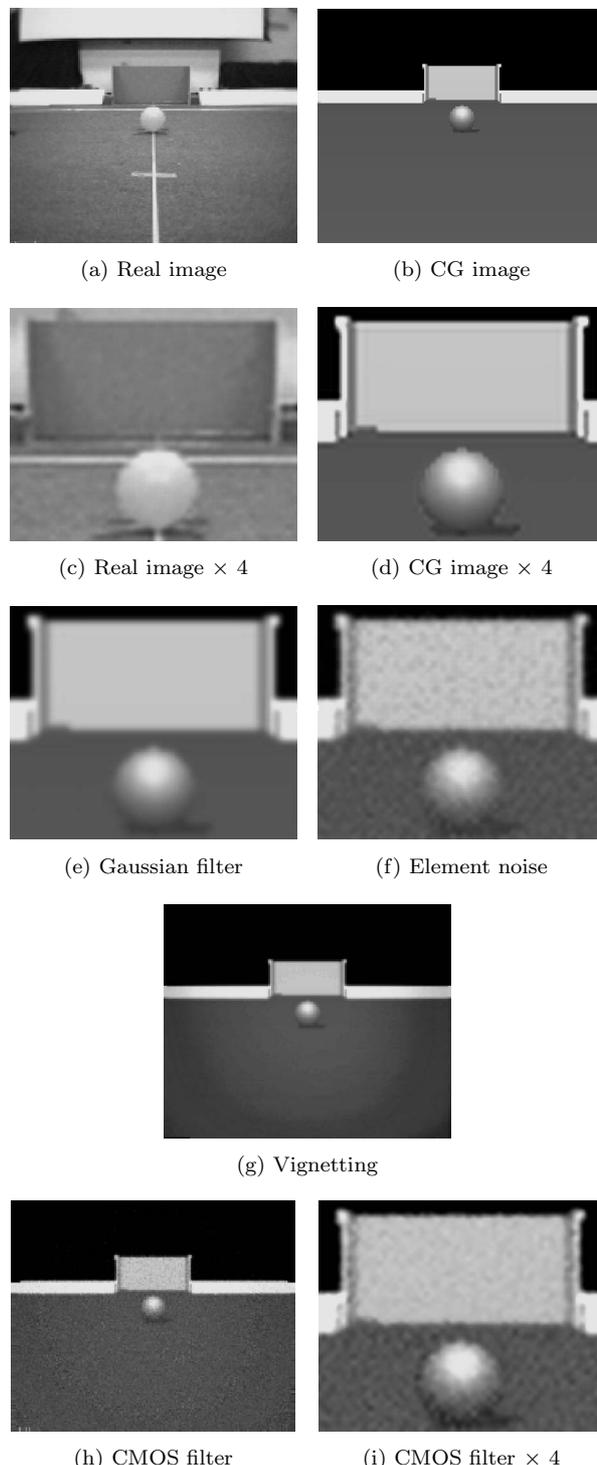


Fig. 7 Camera characteristics

Table 1 ERS-210 camera parameter

CMOS	1/6 inch
Pixels	178 × 144 pixels
Angle of View	H:57.6 deg V:47.8 deg
Lens	F:2.0 f:2.18 mm
White Balance	4300 K
Frame Rate	25 fps
Shutter Speed	1/200 sec

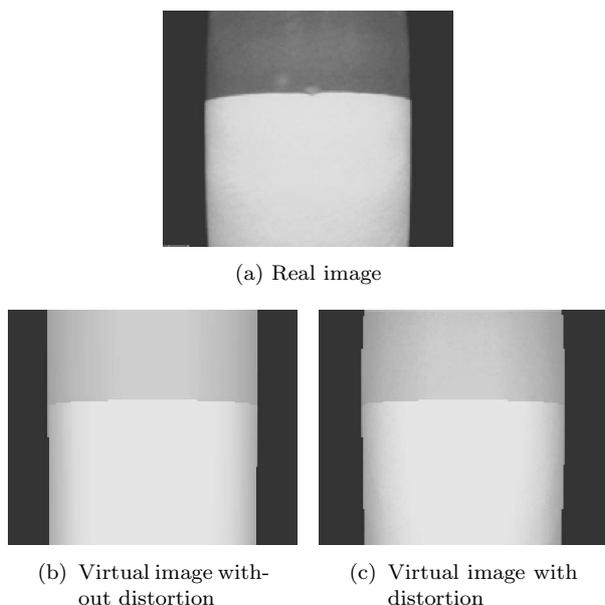


Fig. 8 Lens distortion

またレンズの特性により、画像には一般に周辺減光が生じる。これに対しても、事前に中心画素からの減光の平均値と分散値を実画像から求め、シミュレータの画像に付加する。Fig. 7 (g) に周辺減光を付加した画像を示す。

5.3 レンズの歪曲収差

画像には光学系に起因する歪みが生じる。中でもレンズ放射方向の歪曲収差は、画像に大きく影響を及ぼす。一般に画像平面 (u, v) に対して、以下に示す式

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (2)$$

を用いることで、放射形状に歪んだ画像平面 (\tilde{u}, \tilde{v}) を求めることができる [22]。式 (2) の κ は事前にカメラキャリブレーションによって求められた値を用いる。画像処理ソフト Halcon (MVTec) のキャリブレーション関数を利用して求めた結果、 $\kappa = -0.0126$ が得られた。Fig. 8 (a) に近距離からランドマークを撮像した画像を示す。Fig. 8 (b) は同じものをシミュレータで歪みを考慮せずに生成したものであり、Fig. 8 (c) は歪みを考慮して生成したものである。本来直線の円筒のエッジがたる型に歪んでいるのを、歪曲収差を考慮することによってシミュレータで正確に再現できていることが示されている。

以上に述べてきたカメラの特性（レンズ収差によるボケ、素子ノイズ、周辺減光、歪曲収差）を付加する処理を、CMOS フィルタと呼ぶフィルタにまとめた。600 MHz の Pentium III で画像作成の周期が 112 [ms] であった。この時間はノイズが乗っていない画像の仮想生成と CMOS フィルタの適用を合わせた値である。Fig. 7 (h), (i) に CMOS フィルタを適用した画像を示す。Fig. 7 (a), (c) の実画像に近いシミュレーション画像が得られていることが示されている。

5.4 CMOS カメラのライン露光によるぶれ

撮影領域の画素がすべて同じ期間に光電変換し、信号電荷を蓄積することを蓄積の同時性という。CMOS カメラは各画素の

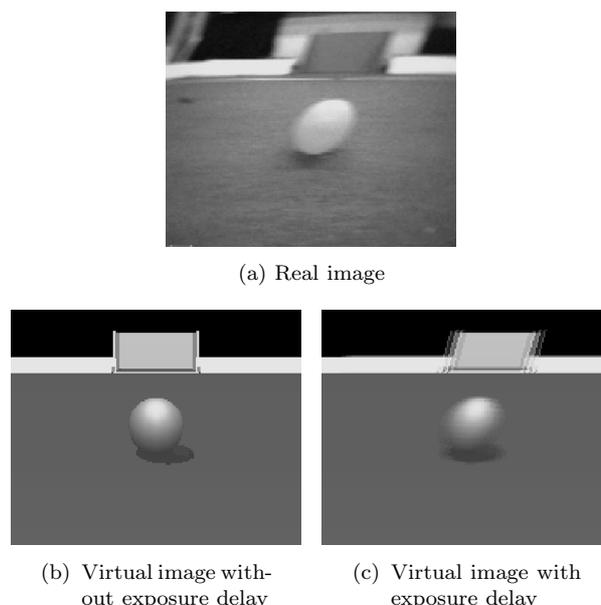


Fig. 9 Exposure delay and shutter speed

蓄積期間が信号の出力されるタイミングに同期するライン露光のため、蓄積の同時性が維持されず、走査線の最初の行と最後の行で蓄積期間が 1 フレーム周期ずれる。よって激しく首を振っているときの画像には歪みが生じる。歪みの大きさは、Table 1 に与えられているカメラの画角・フレームレートから決定される。Fig. 9 (a) に実機で速度 0.30 [deg/ms] で首を左から右に振ったときに撮影される画像を示す。画面全体が角速度、速度に対応して歪んでいる。また、Fig. 9 (b), (c) にそれぞれライン露光を考慮しなかった仮想画像と、考慮した仮想画像を示す。ライン露光の考慮により、シミュレータで画面全体の歪みを再現できていることが示されている。

6. シミュレータの評価

シミュレータが実機での計測などを再現していることを確認するために、ロボカップの試合において大変重要な処理であるボールの計測と自己位置同定について、実機とシミュレータを比較する実験を行った。

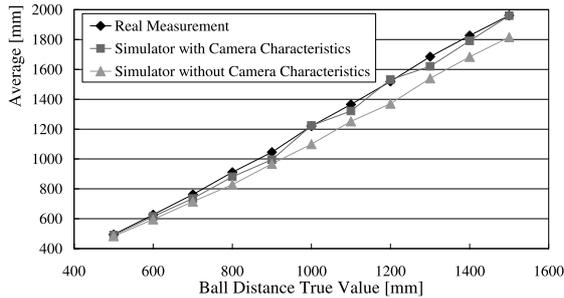
6.1 ボールの距離計測評価

実機とシミュレータ上でボールの距離計測を行い計測値の比較を行った。実機、シミュレータともに同じボール計測のアルゴリズムを用いる。計測は画像上のボールの画素数、重心値、エッジなどから行う。ロボットから一定の距離にボールを置き 100 回の計測を行いその平均と標準偏差を算出した。シミュレータではカメラ特性を考慮した場合としない場合の 2 種類を行った (Fig. 10 参照)。計測した距離の平均および標準偏差を Fig. 11 に示す。平均値は、カメラ特性を考慮した場合のほうが考慮しなかった場合よりも実機での計測結果に近い値を示した。また標準偏差に関しても、カメラ特性を考慮しなかった場合は 0 であった (誤差を加えていないので当然毎回同じ結果となる) のに対して、カメラ特性を考慮した場合は実機の計測結果よりやや小さい値ではあるが、同じ傾向を示した。以上より、ボー

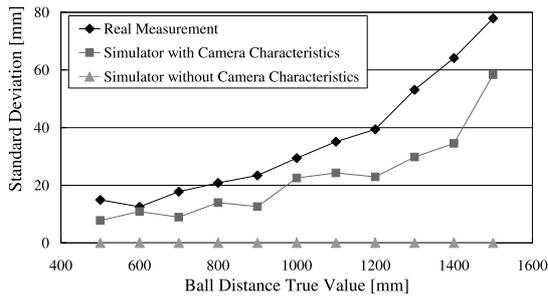


(a) Without consideration (b) With consideration

Fig. 10 Color detection for distance measurement by the simulator with/without considering camera characteristics



(a) Average



(b) Standard deviation

Fig. 11 Comparison of ball distance measurement

ルの距離計測という基本的かつ重要な対象において、カメラ特性を考慮することによって実機をより妥当にシミュレートできていることが示されている。

6.2 自己位置同定評価

実機では自己位置同定手法に Markov Localization の一種である uniform Monte Carlo localization (uniform MCL) を用いている [23]. Uniform MCL は自己位置を多数のサンプルと呼ばれる点を用いて、離散的な確率分布で表現する自己位置同定手法である。この手法を用いた自己位置同定を実機ならびにシミュレータで行った。9 箇所の位置 (直線 $x = 0, 1000, 1750$ [mm] と $y = 0, 500, 1000$ [mm] の交点) と 4 方向の向き ($\theta = \pm 45$ [deg] と $\theta = \pm 135$ [deg]) を組み合わせた 36 通りの位置・姿勢にロボットを置き、おのおの 30 秒間カメラを振り uniform MCL によって自己位置同定を行った。Fig. 12 に実機での実験の様子を示す。テープで示す 9 点が計測位置を示している。左下の計測位置 (フィールドの中心) が原点であり、右方向が x 軸、奥行き方向が y 軸である。結果を Table 2 に示

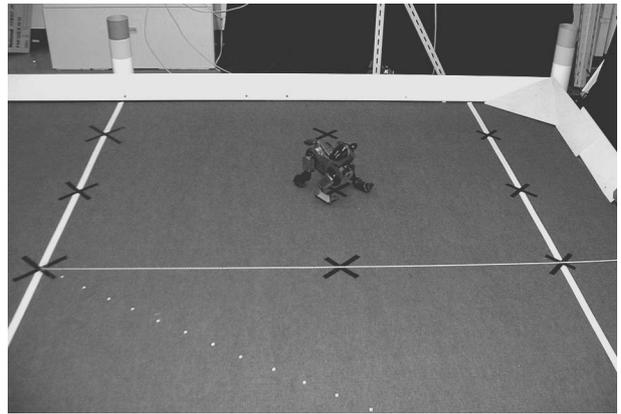


Fig. 12 Self localization by uniform MCL

Table 2 Comparison of self localization

(a) Real robot

	Root Mean Square Error	Maximum Error	Average of Distribution Width	True Value in Distribution
x	186 mm	393 mm	580 mm	61 %
y	141 mm	375 mm	395 mm	58 %
θ	6.5 deg	16 deg	19 deg	67 %
xy	233 mm	393 mm	/	47 %
$xy\theta$	/	/	/	47 %

(b) Simulator without camera characteristics

	Root Mean Square Error	Maximum Error	Average of Distribution Width	True Value in Distribution
x	272 mm	731 mm	603 mm	58 %
y	218 mm	542 mm	527 mm	61 %
θ	9.9 deg	23 deg	39 deg	77 %
xy	349 mm	704 mm	/	42 %
$xy\theta$	/	/	/	42 %

(c) Simulator with camera characteristics

	Root Mean Square Error	Maximum Error	Average of Distribution Width	True Value in Distribution
x	291 mm	731 mm	570 mm	55 %
y	201 mm	564 mm	426 mm	60 %
θ	9.4 deg	26 deg	26 deg	66 %
xy	368 mm	807 mm	/	45 %
$xy\theta$	/	/	/	45 %

す。Table 2 (a) が実機での計測結果、Table 2 (b), (c) がそれぞれカメラ特性を考慮しなかった場合とした場合のシミュレータでの計測結果である。表は左から順に自己位置同定の RMS 誤差、最大誤差、MCL によって求めた分布の平均幅、その分布が真値を含む割合を示す。大まかに言ってシミュレータで MCL の特性を再現することができており、また、全体的にカメラ特性を考慮した方が実機での計測結果に近い結果を得ている。しかしながら前節の実験ほどにはカメラ特性の考慮の結果は顕著ではない。またシミュレーションでの誤差が実機よりも大きい傾向にあるが、これはシミュレータで画像生成と首振りの周期が同期しているため入力画像に偏りが発生し (特に画像

へのノイズを考慮しなかった場合、カメラの方向が同じときに得られる画像がすべて同じものになる), uniform MCL のサンプルが棄却される頻度が少なくなっているからである。これは、Table 2 で “Avg. of Distribution Width” の各値が、カメラ特性を考慮していない Table 2 (b) のほうが考慮した Table 2 (c) のものよりも大きいことから見て取れる。シミュレータをより実機に近づけるための課題が動作生成部にあることが示唆されるが、「ノイズでサンプルの分布が狭くなる」という uniform MCL の定性的な特徴が確認できたという点で、本実験はカメラ特性の考慮の有効性を示していると言える。

7. おわりに

本研究では、ロボカップ 4 足ロボットリーグを具体例として、カメラ特性を考慮した環境・計測シミュレータの開発を行った。

- (1) サーバークライアントシステムを導入することによって、各ロボットの情報の隔離・個体差の確立・処理の分散化を実現した。
- (2) 画像情報を仮想的に作成するために、OpenGL によって環境を作成し、CMOS カメラの特性であるレンズ収差によるボケ、素子ノイズ、レンズの歪曲収差、ライン露光によるずれやボケをそれぞれ付加した。
- (3) ボール計測実験・自己位置同定実験で実機と同様の傾向を示しており、実際の環境をシミュレートできていることを確認した。

以上より、実機に載せられるプログラムの検証を本シミュレータで行うことが可能であり、本シミュレータは、自律移動ロボットのアルゴリズム開発のために有用なツールとして利用可能である。

今後の課題として、外乱や機構の特性を考慮することでロボットの動作を正確にモデル化すること、それらを通してシミュレータとしての完成度を高めることが挙げられる。

謝辞 シミュレータのソースに関して助言をしてくれた中央大学大学院理工学研究科 小村正樹氏に感謝します。また、本研究は、中央大学理工学研究共同研究「四脚ロボットを用いた実世界における複数台移動ロボットの分散協調システムの研究」により行われた。

参考文献

- [1] O. Michel: “Webots: Symbiosis Between Virtual and Real Mobile Robots,” Proc. of ICVW '98 Paris France, pp.254-263, 1998.
- [2] 山田誠二: “行為に基づく環境モデリングのための移動ロボットの進化的行動獲得”, 人工知能学会誌, vol.14, no.5, pp.870-877, 1999.

- [3] 井上康介, 太田順: “部分観測環境における複数タスクに対する行動獲得”, 計測自動制御学会論文集, vol.38, no.7, pp.641-648, 2000.
- [4] 木塚貴登, 永谷圭司: “複数台自律移動ロボット研究のための動作プログラムシミュレータの開発”, 日本機械学会, no.02-6, ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 1P1-G09, 2002.
- [5] 羽田靖史, 油田信一: “移動ロボット用超音波センサシミュレータとその応用”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.857-858, 2001.
- [6] 中村仁彦 他: “仮想ロボットプラットフォーム”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.28-36, 2001.
- [7] 牧田忍, 小寺崇: “馬型 4 足歩行ロボット PONY による遷移歩行”, 日本機械学会, no.02-6 ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2A1-D07, 2002.
- [8] 荒牧浩二, 黒田洋司: “自律型海中ロボット用海中環境シミュレータ”, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.2, pp.557-558, 1995.
- [9] H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, E. Osawa and H. Matsubara: “RoboCup: A Challenge Problem for AI and Robotics,” Proc. of Robot Soccer World Cup I, pp.1-19, 1997.
- [10] 松原仁, 浅田稔, 北野宏明: “ロボカップの歴史と 2002 年への展望”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.2-6, 2002.
- [11] 松井渉, 田中志尚: “RoboCup 小型リーグのための協調戦略プログラム作成支援シミュレータの開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 2A1-J6, 2000.
- [12] 野田五十樹: “シミュレーションリーグとインフラ技術の技術的課題と展望”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.7-10, 2002.
- [13] 藤原広光, 中村恭之: “ロボットサッカー研究のためのシミュレータ開発”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.255-256, 1999.
- [14] M.M. Chang and G.F. Wyeth: “ViperRoos 2001,” Proc. of Robot Soccer World Cup V, pp.607-610, 2001.
- [15] T. Röfer: “An Architecture for a National RoboCup Team,” Robot Soccer World Cup VI Pre-Proceedings, pp.388-395, 2002.
- [16] J.C. Zagal and J. Ruiz-del-Solar: “UCHILSIM: A Dynamically and Visually Realistic Simulator for the RoboCup Four Legged League,” Proc. of RoboCup Symposium 2004, 2004.
- [17] K. Asanuma, K. Umeda, R. Ueda and T. Arai: “Development of a Simulator of Environment and Measurement for Autonomous Mobile Robots Considering Camera Characteristics,” Proc. of RoboCup Symposium 2003, 2003.
- [18] <http://www.tzi.de/4legged>
- [19] H. Kitano, M. Fujita, S. Zrehen and K. Kageyama: “Sony Legged Robot for RoboCup Challenge,” Proc. of IEEE ICRA, pp.2605-2612, 1998.
- [20] OPEN-R プログラミング SIG: C++ で AIBO を自在に動かす OPEN-R プログラミング入門. インプレス, 2002.
- [21] J. Neider, T. Davis and M. Woo: OpenGL Programming Guide. Addison-Wesley, 1992.
- [22] Fest Project 編集委員会編: 新実践画像処理. リンクス, 2001.
- [23] R. Ueda, T. Fukase, Y. Kobayashi, T. Arai, H. Yuasa and J. Ota: “Uniform Monte Carlo Localization—Fast and Robust Self-localization Method for Mobile Robot,” Proc. of ICRA2002, pp.1353-1358, 2002.



梅田和昇 (Kazunori Umeda)

1967年2月6日生。1989年東京大学工学部精密機械工学科卒業，1994年同博士課程修了。同年中央大学工学部精密機械工学科専任講師，1998年より同助教授。2003～2004年カナダNRC Visiting Worker。ロボットビジョンの研究に従事。画像の認識・理解シンポジウム2004 MIRU 長尾賞受賞。博士（工学）。精密工学会，日本機械学会，電子情報通信学会，IEEE等の会員。
(日本ロボット学会正会員)



菊地敏文 (Toshifumi Kikuchi)

1979年5月13日生。2003年中央大学理学部精密機械工学科卒業，2005年同大学院工学系研究科精密工学専攻博士前期課程修了，修士（工学）。現在株式会社リコーに勤務。



大隅 久 (Hisashi Osumi)

1962年3月5日生。1988年東京大学大学院工学系研究科博士課程中退。同年東京大学精密工学科助手。1991年同講師，1993年同助教授，1994年中央大学工学部精密機械工学科助教授，2000年教授，ロボットの機構，制御の研究に従事。工学博士。精密工学会，日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE等の会員。
(日本ロボット学会正会員)



浅沼和範 (Kazunori Asanuma)

1977年9月13日生。2001年中央大学理学部精密機械工学科卒業，2003年同大学院理学系研究科精密工学専攻博士前期課程修了，修士（工学）。



上田隆一 (Ryuichi Ueda)

1978年2月16日生。2001年東京大学工学部精密機械工学科卒業，2003年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年，同専攻博士課程進学。2004年同専攻博士課程中退ののち同専攻助手，現在に至る。ロボカップ4足ロボットリーグを題材として自律移動ロボットの状態推定，行動決定に関する研究に従事。IEEE，精密工学会の正会員。
(日本ロボット学会正会員)



新井民夫 (Tamio Arai)

1947年8月4日生。1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業，1977年同博士課程修了。工学博士。1987年東京大学工学部精密機械工学科教授。1979年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。自動組立，移動ロボットの協調，自律分散システムなどの研究に従事。精密工学会論文賞，IMS賞など。IEEE，CIRPなどの正会員。
(日本ロボット学会正会員)