

投棄ゴミの回収を行う屋外サービスロボットの開発

非会員 小畑 昌之* 正員 西田 健**
 非会員 宮河 秀和* 非会員 近藤 隆史***
 非会員 大川 不二夫***

Development of Outdoor Service Robot to Collect Trash on Streets

Masayuki Obata*, Non-member, Takeshi Nishida**, Member, Hidekazu Miyagawa*, Non-member, Takashi Kondo***, Non-member, Fujio Ohkawa***, Non-member

The outdoor service robot which we call OSR-01 is developed intending for cleaning up urban areas by means of collecting discarded trash such as PET bottles, cans, plastic bags and so on. We, in this paper, describe the architecture of OSR-01 consisting of hardwares such as sensors, a manipulator, driving wheels, etc. for searching for and picking up trash, and softwares such as fast pattern matching for identifying various trash and distance measurement for picking up via the manipulator. After describing the vision system in detail, which is one of the most critical parts of the trash collection task, we show the result of an open experiment in which OSR-01 collects PET bottles on a real shopping street in the special zone for robot research and development in Kitakyushu-city.

キーワード：屋外サービスロボット，投棄ゴミの回収，ロボット実証実験特別区

Keywords: out door service robot, trash collection task, the special zone for robot research and development

1. まえがき

現在までに家庭や介護施設など様々な場面での利用を目的とした非製造業向けのロボットが数多く研究され、様々な形態のロボットが開発されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。特にここ数年のサービス産業向けのロボット技術の発展は目覚ましい。しかしこれらのロボットの多くは屋内用途を前提としており、屋外用途のロボットの数はそれらに比べて少ない。高齢化社会の到来に伴う各種サービスの代行や自動化のためのロボットに対する要求が高まる近年の情勢にあって、日常的に人間の生活環境に入り込んで屋外作業を行うロボットの

開発は重要な研究課題である。しかし屋外用途を目的として研究開発されている各種ロボット⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾においても、商店街など周囲に歩行者の存在する状況下での利用を前提とする自律移動ロボットに関する研究は非常に少ない。

このような状況の中、福岡県、福岡市、北九州市は日本政府から2003年11月にロボット開発・実証実験特区の指定を受け（通称ロボット特区）、所轄警察から許可を得た商店街などの屋外公共エリアを使用するロボットの実験が可能となった。そこで筆者らはこの特別区の優位性を生かし、商店街における投棄ゴミの回収を行う屋外サービスロボット（OSR：Outdoor Service Robot）の開発を開始した。実際の商店街のニーズから、ロボットには商店街のゴミを探索し回収する機能や、来客の出迎え、案内、情報提供を行う機能が求められる。これらの要求に応えるロボットとして、まず、実際の商店街においてペットボトルや空き缶などのゴミをロボットが自律動作で探索し回収する機能を持つ屋外サービスロボットのプロトタイプ機 OSR-01 の開発を行った。本ロボットは複雑で急激に変化する屋外環境下において、目的の対象物をビジョンシステムにより認識する機能を備えた自律移動型ロボットの基礎研究を目的として開発された。また、実環境にロボットを適合させるための課題の抽出と改善を行うため、福岡県のロボット特区制度を有効活用して実際の商店街においてフィールド

* 安川情報システム（株）

〒806-0037 北九州市八幡西区東王子町5-15
 YASKAWA INFORMATION SYSTEMS Corporation
 5-15 Higashiojimachi, Yahatanishi-ku, Kitakyushu 806-0037

** 九州工業大学工学部制御工学教室

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1
 Department of Control Engineering,
 Kyushu Institute of Technology

*** 九州工業大学情報工学部システム創成情報工学教室

〒820-8502 飯塚市大字川津680-4
 Department of System Innovation and Informatics,
 Kyushu Institute of Technology
 680-1, Ooaza Kawatsu, Iizuka 820-8502

テストを実施した。本論文では OSR-01 の機構や機能をはじめ、ビジョンシステムによる対象物の認識システムについて網羅的に述べる。現在までに、清掃作業を行うロボットは愛知万博などでも発表されているが、これらのロボットは指定された経路上を一括して吸引するのに対して、本ロボットは人の往来がある商店街などで対象を識別しマニピュレータでそれらを収集することを目的とするため、両者のロボットを構成する技術や動作のアルゴリズムは大きく異なる。

以下では、2 節で OSR-01 の構成や動作の概要について示し、3 節で投棄ゴミの検知手法を示す。また、4 節で検知対象物の計測と、それに接近するためのロボットの走行系制御手法について述べ、5 節で屋外サービスロボットの試験により提案法の有効性を検証し、最後に 6 節で結論を述べる。

2. OSR-01 の概要

2.1 OSR-01 の構成 図 1 と表 1 に、それぞれ OSR-01 の構成と諸元を示す。

2.1.1 マニピュレータ 肘 1 自由度、肩と手首に 2 自由度の計 5 自由度、エンドエフェクタ開閉 1 自由度の合計 6 自由度を有しており移動時にはマニピュレータを折りたたむことができる(図 11(a) 参照)。

2.1.2 外装 外装デザイン(図 1(a))に曲線を多く取り入れることにより周囲の歩行者に与える印象を優しくする効果を狙っている。外装の素材は FRP である。

2.1.3 センサ レーザレンジファインダ(LRF: Laser Rangefinder)が 4 台、マニピュレータの根元付近にアームカメラが 2 台、エンドエフェクタ付近にハンドアイカメラが 1 台、装備されている(図 1(b))。OSR-01 の前後左右に搭載された各 LRF により LRF 前方の水平面 180[deg] を 10[Hz] でスキャンし、OSR-01 の周囲 360[deg] の障害物の検知を行う。また、アームカメラは 2 自由度を有した肩部マニピュレータの動作によって、パン(-60~+60[deg])およびチルト(-45~+90[deg])させることが可能であり、これらによって路面上の投棄ゴミの探索と検知を行う。ハンドアイカメラは物体把持の際の対象物の姿勢計測に用いる。

2.1.4 計算機 自律動作と駆動部などのモーション制御を行うメイン計算機と、画像処理を行うサブ計算機の 2 台が搭載されている(図 1(c))。メイン計算機の OS に RT-Linux を採用し、全 8 軸のサーボモータの制御演算、マニピュレータ部の運動学演算を含む指令生成、移動機構部の指令生成などの処理を 1[ms] の周期で行っている。また、自律動作のための演算処理や LRF からのデータ取得も同時に行っている。サブ計算機には画像入力カードを搭載したラップトップ(OS:Linux)を用いている。メイン計算機とサブ計算機は体内 LAN で接続されており、これらの計算機の通信によって画像処理部とモーション制御部が連動するロボットシステムを構築している。さらに、無線 LAN

表 1 OSR-01 の諸元

Table 1. Specification of OSR-01.

D.O.F.	manipulator	5
	hand	1
	drive wheel	2
dimension	height	600[mm]
	width	500[mm]
	depth	600[mm]
	manipulator length	750[mm]
weight	45[kg]	
running speed	1.8 [km/h]	
sensor	LRF	4
	color CCD camera	3

を用いて外部計算機と通信可能であり、ジョイスティックを用いた遠隔操作も可能である。

2.2 投棄ゴミの回収動作の流れ OSR-01 が商店街で投棄ゴミの回収を行うための動作の流れを以下に示す。

- (1) 予め設定された経路を巡回する。
- (2) アームを左右に振り、3 節に示す手法で経路上のゴミを探索する。
- (3) ゴミを検知した場合に 4 節に示す手法で対象を計測し、以下の二種類の制御系を同時に駆動して対象物に接近する
 - (a) 対象物の中心がカメラ画像の中央と一致するようにアームの角度を制御する。
 - (b) マニピュレータの各関節が予め定められた角度、すなわち対象物の把持が可能な姿勢になるように台車の駆動輪を制御する。
- (4) 対象物に対して一定距離に接近した後、4.1 節に示す手法もしくはステレオ視⁽¹¹⁾によって対象物の詳細な位置を計測し、その上方にマニピュレータを振り挙げ、物体把持の姿勢をとる。
- (5) 4.4 節に示すハンドアイを用いる手法によって対象物の位置と姿勢を計測する。
- (6) 把持および格納を行う。

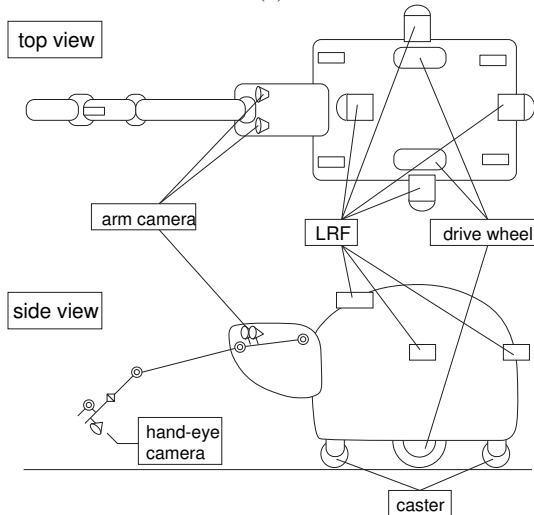
3. 投棄ゴミの検知

3.1 対象物検知の流れ 対象物の検知とトラッキングを行うために、OSR-01 は主に三種類の画像処理アルゴリズムを切り替えて用いる⁽¹⁶⁾(図 2)。すなわち、ペットボトル等の特定の形状を持つ対象物の検知を固有空間法⁽¹⁴⁾によって行い、検知の確度が高くロボットの最近隣にあると推定される対象物の追跡を CAMSHIFT アルゴリズム⁽¹⁵⁾によって行う。これらの一連の画像処理の実験結果の例を図 3 に示す。また、エンドエフェクタによる把持動作のための物体の姿勢計測には、色相値抽出に基づく画像処理を行う。以下では各処理の詳細に付いて述べる。

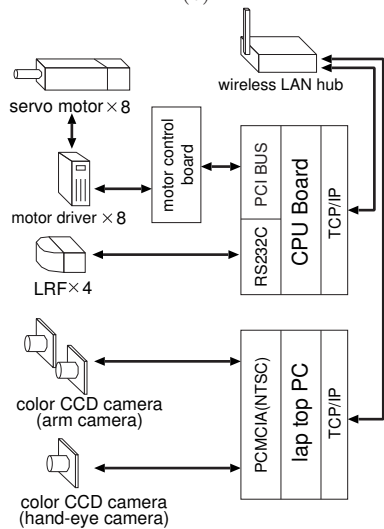
3.2 固有空間法による物体検知 アームカメラ画像における対象物検知に用いることが可能な物体認識手法が現在までに数多く提案されている。これらの手法は、ステレオ視により対象物の立体的な特徴を抽出して検知する手



(a)



(b)



(c)

図 1 OSR-01 : (a) 概観; (b) 機構図; (c) 体内情報通信の概要

Fig. 1. OSR-01 : (a) overview of the robot; (b) schematic diagram; (c) electronic architecture.

法と、固有空間法などに代表されるような一台のカメラによる対象物検知手法の二種類に分類できる。一方、これらの対象物検知手法を OSR-01 に実装するためには、具体的に以下のような制約を考慮しなければならない。すなわち、

(i)Pentium4 の 3GHz 相当のラップトップに実装した場合に 640×480 [pixel] の画像を 5 [fps] 程度で処理可能であること、(ii) 屋外での環境光の変化にロバストな認識が可能であること、(iii) アルゴリズムのパラメータ調整が容易であること、などである。前者の手法には、激しい環境光の変化や歩行者の存在、移動に伴う画像の振動などによる画像間対応点の発見の困難さの問題が存在し、これを克服するための計算コストは膨大である。一方後者の手法は、検知しようとする対象物を予め様々な角度から撮影して大量のテンプレートパターンを用意する必要があるが検知処理自体は高速である。また、固有空間法の類似度計算を正規化相関によって行うことにより、複雑な背景や環境光の変化に対する頑健な認識が可能であることが知られている⁽¹²⁾。以上の理由より、OSR-01 への実装のための上述の制約を満たす手法として、高速フーリエ変換と K-L 変換を用いる高速な物体検知手法⁽¹⁴⁾を採用した。以下に、この手法について簡潔に示す。ただし、以下では全てグレースケール

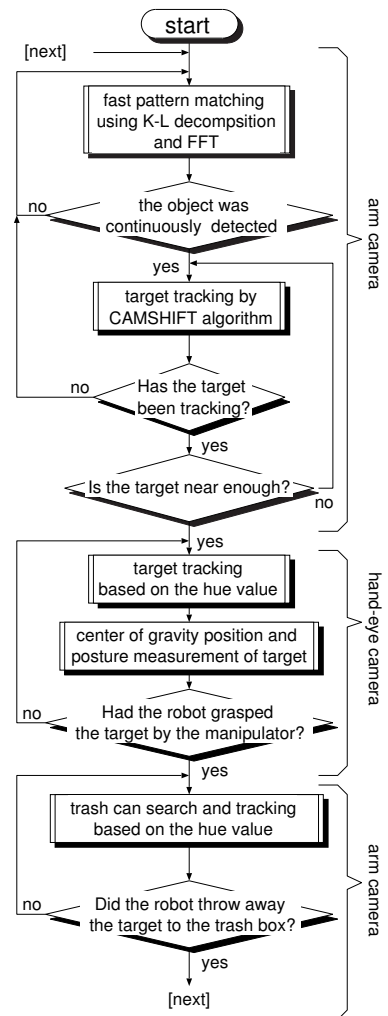


図 2 ゴミ回収のための画像処理のフローチャート

Fig. 2. Flowchart for the image processing of the trash collection task.

の輝度画像を扱うことに注意されたい。

3.2.1 部分空間の構築 まず $M \times N$ 画素のテンプレート画像の集合を $q_n(x) \triangleq q_n(x, y)$, ($n = 1, \dots, N_t$) を用意し, さらにそれらを $MN (= M \times N)$ 次元の縦ベクトル q_n に変換し, それらを用いて行列 $Q = [q_1 - \bar{q}, q_2 - \bar{q}, \dots, q_{N_t} - \bar{q}] \in \mathbb{R}^{MN \times N_t}$ を構成する。次に Q を以下のように特異値分解する。

$$Q = UDV^T \dots \dots \dots (1)$$

ここで, \bar{q} は q_n の平均ベクトルであり,

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_{N_t}) \in \mathbb{R}^{MN \times N_t} \dots \dots \dots (2)$$

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_{N_t})^T \in \mathbb{R}^{N_t \times N_t} \dots \dots \dots (3)$$

は直交行列である。また,

$$D = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_{N_t}] \dots \dots \dots (4)$$

であり, $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_{N_t}$ である。次に, 寄与率や認識実験を基に $K (< N_t)$ の値を定め, $u_i (i = 1, \dots, K)$ と \bar{q} を用いて

$$u_0 = \frac{\bar{q} - U'a^c}{\|\bar{q} - U'a^c\|} \dots \dots \dots (5)$$

を求める。ここで,

$$a^c = U'^T \bar{q} \dots \dots \dots (6)$$

$$U' = [u_1, u_2, \dots, u_K] \dots \dots \dots (7)$$

である。これらをまとめて,

$$\bar{U} \triangleq [u_0, u_1, \dots, u_K] \dots \dots \dots (8)$$

を事前に構築し保持しておく。以上の処理は離散的 K-L 変換⁽¹³⁾ と呼ばれる。

3.2.2 部分空間における画像照合 まず, 入力画像 $p(x) \in \mathbb{R}^{M \times N}$ をベクトル $p \in \mathbb{R}^{MN}$ に変換する。次に, 部分空間に写像した入力画像と事前に保持している部分空間との正規化相関値

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^K (u_i^T p)^2}}{\|p\|} \dots \dots \dots (9)$$

を計算する。ここで \bar{p} は p の全ての要素の平均が 0 となるように値をシフトしたベクトルである。この正規化相関の値があるしきい値 th_r 以上になる場所に対象物があるとす。さらに複数回かつ連続で検知された対象物の中でロボットに最近隣のものを目標物とし, その位置を x_d とする。ここで式 (9) は FFT (Fast Fourier Transform) を用いることにより, 直接テンプレート画像との照合を行うよりも大幅に計算コストを低減できる。

3.3 目標物の追跡 CAMSHIFT アルゴリズム⁽¹⁵⁾

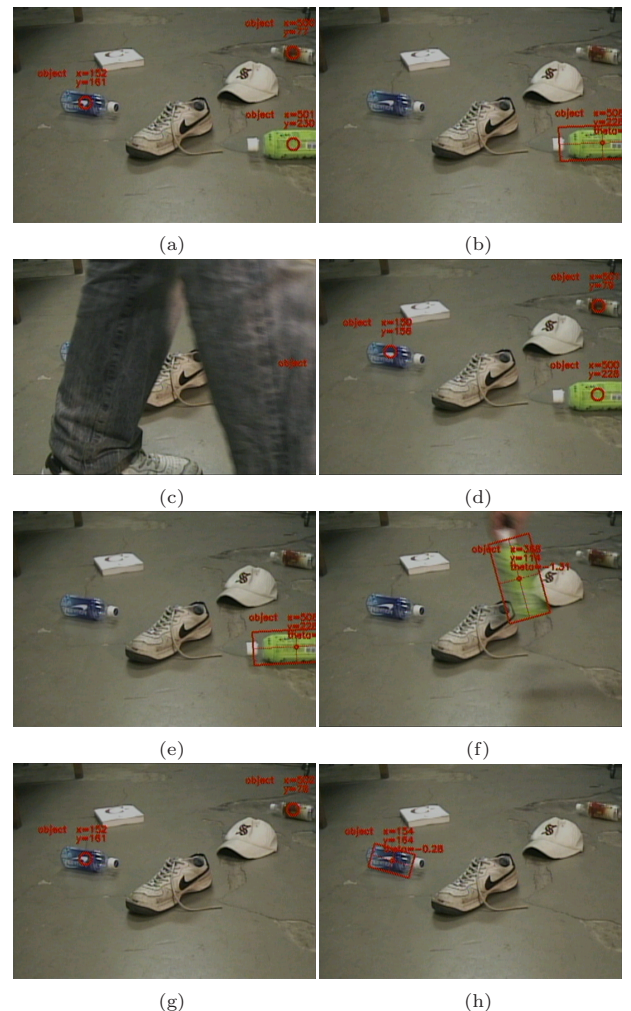


図3 画像処理の例:(a) 対象物の検知; (b) 複数回検知され, かつ最近隣の目標物の計測と追跡; (c) 歩行者が原因で対象物を見失う; (d) 再検知; (e) 目標物の追跡; (f) 高速に移動する目標物の追跡; (g) 目標物が画像中から除かれたため再検知; (h) 目標物の追跡

Fig. 3. Example of image processing : (a) detection of the objects; (b) measurement and tracking of the nearest target object continuously detected; (c) losing sight of the target object because of the pedestrian; (d) re-detection of the objects; (e) tracking of the target object; (f) tracking of the target object which moves at high speed; (g) the target was excluded and re-detection of the objects; (h) tracking of the target object.

によって目標物の追跡を行う。このアルゴリズムは, 入力画像を HSV 変換することによって得られる色相値の分布を参照しながら指定領域周辺の色相値の勾配を検査し, その勾配のピーク周辺の領域を追跡するというノンパラメトリックな手法である。このアルゴリズムは, ノイズに対する頑健性を持ち, 目標物追跡領域を前フレームの追跡領域の周辺に限定するため計算量が少なく, ビデオレートでの処理が可能である。初期の追跡領域は, 3.2.2 項で述べた手法で検知された x_d 周辺領域に設定する。

4. 目標物の計測

OSR-01 の大きさや姿勢が既知であることと、目標物がロボットと同一の床面にあるという制約条件を用いると、一台のカメラによる目標物の検知結果のみで目標物の位置を算出することが可能である。以下では、一台のアームカメラによる検知結果から目標物の位置を算出する方法を示す。

4.1 目標物の位置計測 まず、ロボット座標系を $\Sigma_r = \{r_x, r_y, r_z\}$ 、カメラ座標系を $\Sigma_c = \{c_x, c_y, c_z\}$ 、カメラの画像平面座標系を $\Sigma_s = \{s_x, s_y\}$ とし、それらの位置関係を図 4 に示す。画像平面座標系における目標物の位置 $x_d = (x_d, y_d)$ と、ロボット座標系における目標物の位置 $r_p = (r_{px}, r_{py}, -h)$ の関係は以下のように求まる。まず r_y 軸周りに ϕ 、 r_x 軸周りに θ の回転を行う回転座標変換を $R_{yx}(\phi, \theta)$ と記述すると、 Σ_r の原点から Σ_c の原点へ向かうベクトルは $R_{yx}(\phi, \theta)b \triangleq r_b$ と書ける。ここで b はロボットのアームに取り付けられたカメラの位置と姿勢で決まるため既知であり変化せず、 (ϕ, θ) はロボットの姿勢より逐次知ることができる。また、カメラ座標系の原点から画像平面座標系上の点 x_d までのベクトルを $c_d \triangleq (x_d, y_d, f_a)$ と表すと、これはロボット座標系において $R_{yx}(\phi, \theta)^c d \triangleq r_d$ と表現できる。ただし c_d の各要素は距離を表し、 f_a はアームカメラの焦点距離である。これらから目標物の位置は以下のように推定できる。

$$r_p = r_b + \frac{n^T(r_b - h)}{n^T r_d} r_d \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $n = (0, 1, 0)^T$ かつ $h = (0, h, 0)^T$ である。

しかしロボットの姿勢や対象物の存在する場所によっては対象物が床面に落ちているという拘束条件を利用できない場合があるため、2.2 の手順 (4) に述べたステレオ視による距離測定手法を作業の場面に応じて上述の処理と切替えて用いる (本研究で用いたステレオ視のアルゴリズムの詳細は文献 (11) を参照されたい)。すなわち、本研究ではロボットの把持回収の対象としてペットボトルと缶を想定しているため、上述の手法で推定した距離にある目標物の画像中での画素数と形状はある程度限定される。したがって推定距離に応じた目標物の大きさ (画素数) とその画素集合に最小適合する方形の縦横比を予め調べておき、それらの値と著しく異なる目標物は床面にないと判定する。

4.2 アームカメラの制御 OSR-01 は目標物を検知した後、アームにより把持可能な距離まで接近しなければならないが、同時に目標物がカメラの視野角から外れないようにカメラのパン・チルト動作を制御しなければならない。カメラの姿勢は関節角度 θ と ϕ により制御されるので、それらの角度を以下のように与える。

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_{01} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -k_{02} & 0 \\ 0 & k_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \dots \dots \dots (11)$$

ゲイン k_{01} , k_{02} , $k_{12} > 0$ は設計パラメータである。これにより台車の向きに合わせてカメラの姿勢が目標物に正対

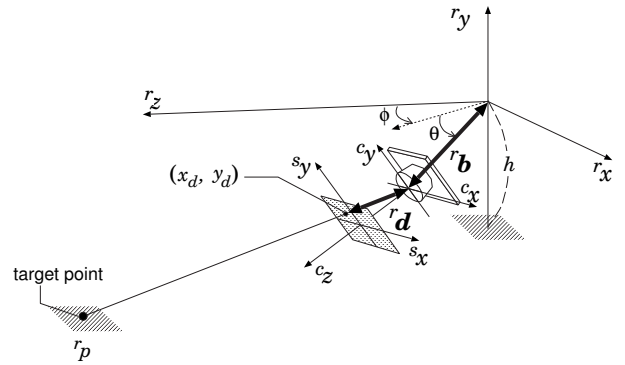


図 4 カメラ座標系とロボット座標系の関係

Fig. 4. Relation of the camera coordinate system and the robot coordinate system.

するように制御される。

4.3 走行制御系 各駆動輪は式 (10) で得られた目標物の位置を参照しながら、目標物に対して一定距離に接近するまで以下のように制御される⁽¹⁷⁾。左右駆動輪への入力角速度 $w \triangleq (w_l, w_r)^T$ は

$$w = R_g v \dots \dots \dots (12)$$

で与える。ここで

$$R_g = \frac{1}{r_w} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 1 & -l \end{pmatrix}, \quad v = (v_g, w_g)^T \dots \dots \dots (13)$$

である。 r_w は駆動輪の半径、 l は駆動輪とロボット重心の距離、 v_g はロボット重心の移動速度、 w_g は重心の回転角速度である。目標位置に向かうためのロボット座標系における速度入力は次のように決定する。

$$v = K (r_p - m) \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 $m \triangleq (0, 0, m)$ であり、 m はアームの回転中心と重心の距離である。また、 K は目標物までの距離に対するゲイン k_r とアームのパン角 θ に関するゲイン k_θ を用いて

$$K = \begin{pmatrix} k_r & 0 \\ 0 & k_\theta \end{pmatrix} \dots \dots \dots (15)$$

と表される。 k_r と k_θ は周囲や路面の状況に応じて調整する。したがって、式 (12) と式 (14) より各駆動輪の速度は以下のように決定される。

$$w = R_g K (r_p - m) \dots \dots \dots (16)$$

ただし w は予め設定された最高速度は越えない。

4.4 ハンドアイによる対象物計測 ロボットは目標物に対して一定の距離に接近した後に、アームを目標物体の上方に振り上げ物体把持のための初期姿勢をとる (図 6(a) および図 11(c) 参照)。その後、ハンドアイによって目標物を撮影し、目標物把持のためのアームの姿勢やエンドエフェクタの把持角度を計算する。ここでは、ハンドア

イによって目標物の把持領域の特定と把持角度の算出方法について述べる。

ハンドアイの画像平面座標系を $\Sigma_i = \{i_x, i_y\}$ 、エンドエフェクタ座標系を $\Sigma_h = \{h_x, h_y, h_z\}$ と表す。ハンドアイ画像における把持対象領域の特定には、事前の動作シーケンスにおいて獲得した目標物の色相値を用いる。すなわち、特定の色相値の領域を画像中から検索し、その中から最大面積を持つ領域に最小適合する方形を二次モーメント量の計算により求める⁽¹³⁾。この方形が求めれば、ハンドアイ画像平面上の目標物の中心 (x_e, y_e) と方形の傾き θ が求まる。ハンドアイの画像処理結果の例を図 6(b) に示す。したがって把持対象物の位置 $(x_t, y_t, z_t) \in \Sigma_h$ は、エンドエフェクタの初期姿勢の高さ h_h (一定) と検知したゴミの種類から推定される目標物の高さ h_t を用いて

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_e z_t) / f_h \\ \{(y_e + l_h) z_t\} / f_h \\ h_h - h_t \end{pmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

と計算できる。ここで、 f_h はハンドアイカメラの焦点距離であり、 l_h は Σ_i と Σ_h の h_y 軸方向のバイアスである。エンドエフェクタの姿勢は $\theta \rightarrow 0$ となるように制御すればよいので、これらの計算結果に従ってアームとエンドエフェクタをフィードフォワード制御し物体の把持および回収を行う。

5. 実験

5.1 テンプレート画像の収集とパラメータ決定 物体検知に用いる \bar{U} の生成のために、三種類のペットボトルについてテンプレート画像を収集した。OSR-01 の 500[mm] から 2000[mm] 前方の範囲で対象物の検知を行うことを想定し、図 7 に示すような条件で画像を撮影し収集した。すなわち、カメラの高さは 400[mm]、見下ろし角度を $\theta_p = 10$ 度、20 度、30 度、40 度、回転角度を $\theta_r = 0, 10, \dots, 350$ 度とした。また、これらの画像はペットボトルの中心と画

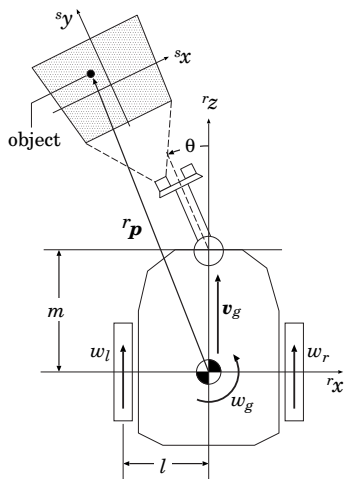
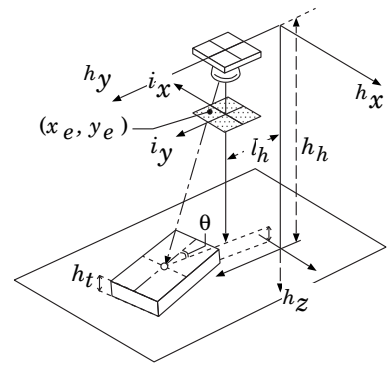
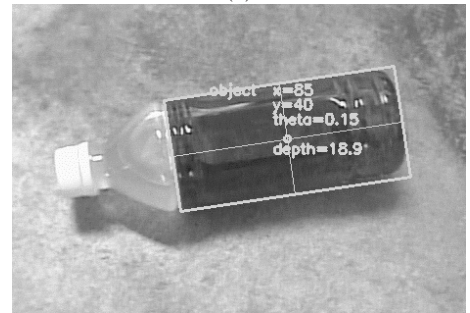


図 5 OSR-01 の走行制御

Fig. 5. Running control of OSR-01.



(a)



(b)

図 6 ハンドアイ：(a) ハンドアイ画像平面座標系とエンドエフェクタ座標系の関係図；(b) 検知した対象物に対する最小適合方形と重心、姿勢、距離を計測した結果の例

Fig. 6. Hand-eye : (a) relation of the hand-eye coordinate system and the end-effector coordinate system; (b) example of calculating result of circumscribed rectangle of minimal area, center of gravity, posture, and distance of a target object.

像の中心が一致するように撮影されている。背景の画素値は 0、解像度 150×110 [pixel] として 431 枚の画像を収集した。それらの一部を図 8 に示す。

次に、これらの画像を K-L 変換する際の固有ベクトルの次元数は処理速度と認識精度のトレードオフに影響を与えるため、屋外環境に投棄されたペットボトルを撮影した画像を用いて実験的に固有ベクトルの次元数 $K = 20$ と決定した。また検知処理に用いるしきい値は $th_r = 0.7$ とした。図 9 に上述のパラメータを決定するために行った屋外でのペットボトル検知実験の結果の例を示す。640×480 画素の中央から 480×480 画素を切り抜き、512×512 画素に拡大して入力画像として処理した。これらの結果から、ペットボトルの位置や姿勢に依らず精度良く検知が行われていることがわかる。また、この処理に要するフレームレートは、Pentium4 の 3GHz 相当のコンピュータで 5[fps] であり十分に高速であった。

5.2 商店街におけるフィールドテスト 我々は北九州市にある熊手商店街で OSR-01 のフィールドテストを行った。この商店街には高さ約 5[m] のアーケードがあり、このアーケードの天井はすりガラスであるため、天候によってアーケード内の明るさは変化する。またアーケードの道

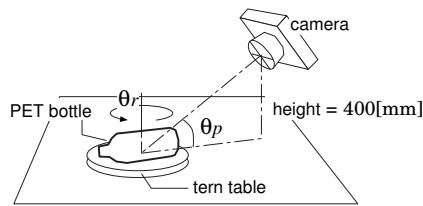


図 7 テンプレート画像の撮影条件
Fig. 7. Condition of taking images.

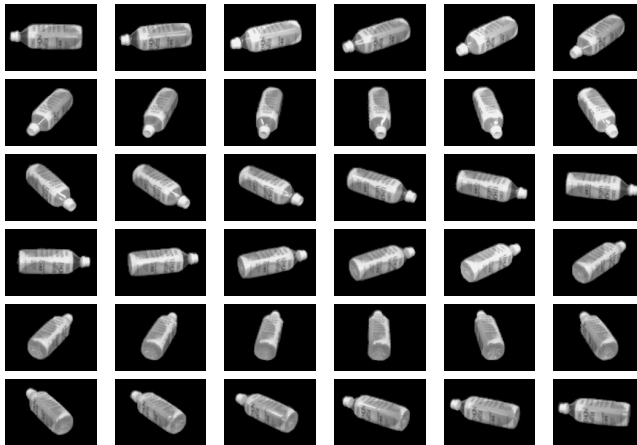


図 8 ペットボトル画像の例 (全 431 画像中の 36 画像)

Fig. 8. Example of PET bottle images (36 of 432 are shown).

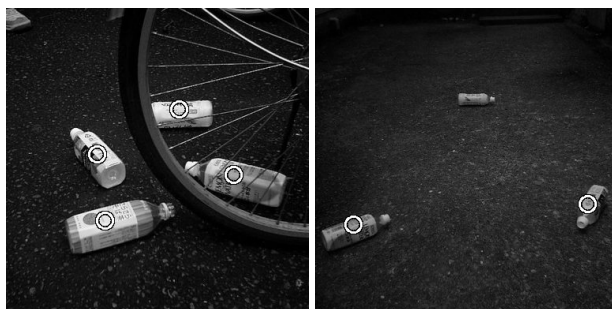


図 9 屋外での検知実験例

Fig. 9. Examples of the detection experiment.

幅は約 8[m] であり、床には複数の色のタイルが敷き詰められている。

まず搭載された LRF から得られるロボット周囲の距離情報を用いて、歩行者の接近の検知と回避動作に関する実験を行った。これにより、OSR-01 は歩行者の接近を検知し回避して目標物に接近できることが確認された。次に、ロボットの 3[m] 前方の路面上にペットボトルを置き、ロボットの対象物への接近・把持回収動作の精度の計測を定量的に検証した。図 10 に目標物に接近する際のロボットの移動速度変化の例を示し、表 2 に実験の結果と各実験におけるロボットの目標物への接近の精度を示す。また、この実験の様子の一例を図 11 に示す。ここで表 2 の精度は、ロボットが目標物に対して距離 433[mm]、角度 0[deg] で停止

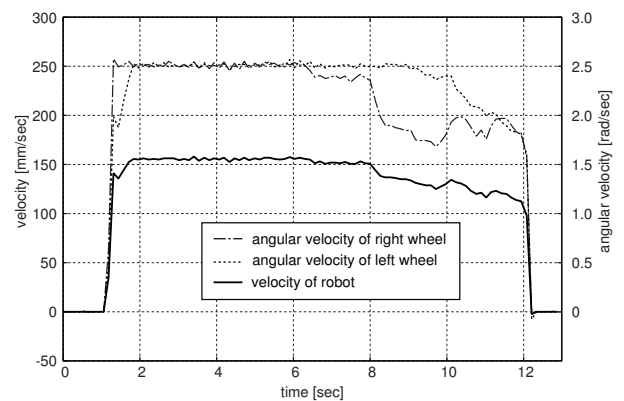


図 10 目標物に接近する際のロボットの速度の例
Fig. 10. Example of velocity of robot approaching target object.

すべきであるとしてその点を基準点とし、そこからの距離と角度の誤差を示している。負の距離の値は基準点よりも接近し過ぎた場合を表し、負の角度の値はロボットの進行方向に対して左方向への誤差を表す。図 10 より目標物に対する接近において速度制御系が適切に駆動されていることが分かる。また本ロボットの把持可能領域は上述の基準点から ± 43 [mm] かつ ± 40 [deg] の範囲であり、全ての実験において把持可能な位置まで接近できたことが表 2 より分かる。18 度目の実験における把持の失敗は、ロボットがハンドアイカメラの露光調整中に把持動作に入ったことが原因で生じた。すなわち、ハンドアイカメラの露光調整に必要な時間は環境光によって変化するが、これを考慮しない動作シーケンスを構築していたために適切な把持位置の計算が行われず把持に失敗した。この対策として、カメラの露光調整の終了を検査することが考えられる。

また一方、上述の実験とは異なる環境で実験を行った際に、大きく環境光の強さが異なるアーケードの入り口付近などでカメラ画像の一部が白とびし、対象物を認識できない場合があった。さらに、対象物検知の処理アルゴリズムからも明らかなように、床面と近い輝度値や色相値を持つ投棄ゴミは認識できなかった。これらの改善方法として、アーケード入口付近では日光の影響を受けにくい方向からのゴミ探索を行うなどの探索経路の工夫や、環境光の影響を受けにくい近赤外線光を照射する LRF の使用による対象物の形状計測などが考えられる。

6. あとがき

本稿では、開発した屋外サービスロボット OSR-01 の構成とビジョンシステムについて述べた。また、OSR-01 が実際の商店街においてゴミを検知し回収する実験を行った結果を示した。

今後の課題として以下のことが挙げられる。まずセンサによる環境認識や画像認識の計算速度とロボットの動作速度の関係を明らかにし、認識処理速度や動作速度を適応的

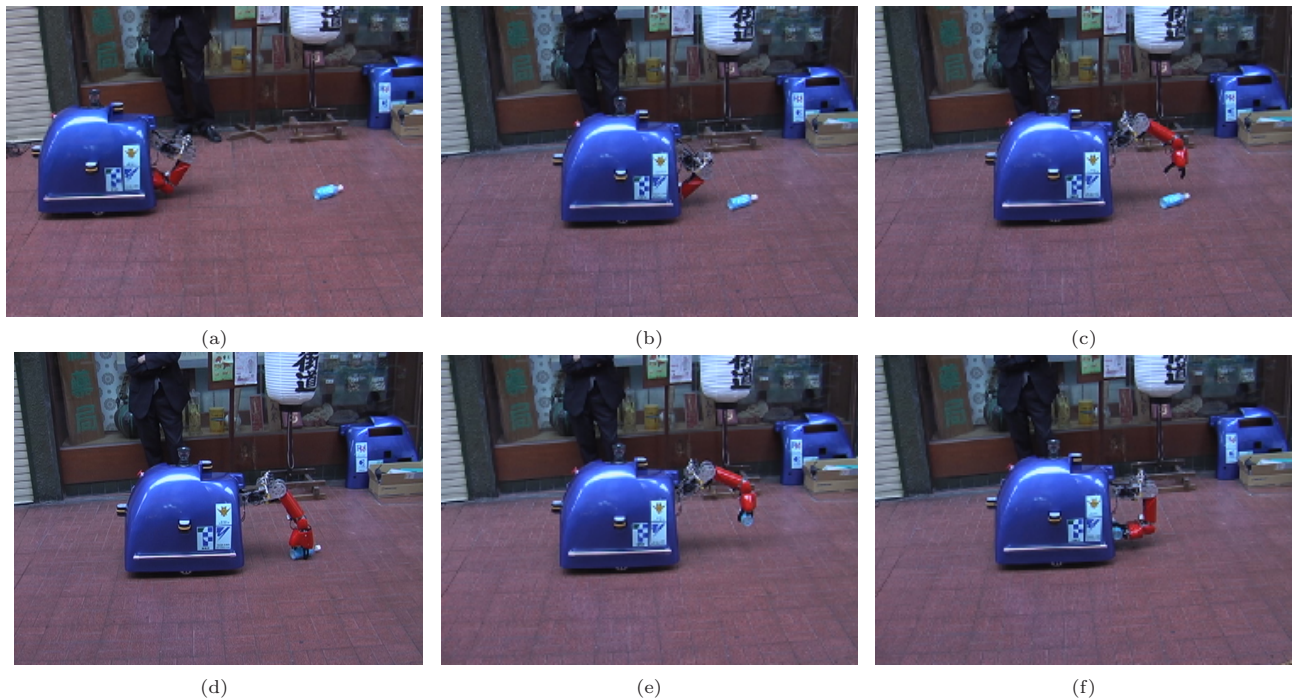


図 11 商店街で OSR-01 がペットボトルを回収する様子: (a) 巡回中にペットボトルを検知; (b) 対象物に接近; (c) 対象物把持のための初期姿勢; (d) 対象物の把持; (e) 持ち上げ; (f) 格納

Fig. 11. OSR-01 collects up a PET bottle in shopping street: (a) a PET bottle was detected while patrolling; (b) approaching to the target; (c) initial posture for object holding; (d) holding of the target object; (e) lift; (f) storage.

表 2 目標物への接近の精度と投棄ゴミ回収結果
Table 2. Accuracy of approach to target object and results of trash collection.

実験回	把持結果	距離 [mm]	角度 [deg]	条件
1	成功	+39	-8	約 2%の下り坂
2	成功	-6	-9	約 2%の下り坂
3	成功	-29	-7	約 2%の下り坂
4	成功	-7	-6	約 2%の下り坂
5	成功	-42	-7	約 2%の下り坂
6	成功	-38	-15	約 2%の下り坂
7	成功	0	-13	約 2%の下り坂
8	成功	-37	-8	約 2%の下り坂
9	成功	-5	-1	約 2%の下り坂
10	成功	-24	-8	約 2%の下り坂
11	成功	-33	-8	約 2%の上り坂
12	成功	-24	-8	約 2%の上り坂
13	成功	-11	-7	約 2%の上り坂
14	成功	-5	-1	約 1%の上り坂
15	成功	+14	-3	約 1%の上り坂
16	成功	+8	-9	約 1%の上り坂
17	成功	+23	-2	約 1%の上り坂
18	失敗	+8	+1	約 1%の上り坂
19	成功	+27	-2	約 1%の上り坂
20	成功	+5	-13	約 1%の上り坂

に調整する機構を備える必要がある。ロボットの動作速度よりも速すぎるセンシングはバッテリーや体内 LAN の通信コストの浪費を招き、画像処理の遅延はロボット全体の動作のボトルネックになる。次に、商店街などでの利用を前提とするロボットにおいて周囲の人間に対する安全性は

最も重要な仕様要求であるため、今後はさらに安全性能を考慮したハードウェア構成や各動作のペリフィケーションを充実させる必要がある。具体的な手段として、LRF を活用した障害物に対する回避・停止機能の充実や、接触センサなどの搭載などを予定している。また、本ロボットの实用化に向けて、今後も福岡県のロボット特区制度を有効活用し、市街地環境におけるフィールドテストをさらに繰り返し実施し、実環境へ適応させるための課題の抽出と改善に取り組む予定である。

謝 辞

本ロボットシステムの開発は産学官プロジェクトとして、九州工業大学、安川情報システム(株)、木原鉄工所(財)北九州産業学術推進機構 [FAIS]、福岡県工業技術センター機械電子研究所からなる多くのメンバにより研究開発が行われた。本論文はメンバ全員の成果である。また本プロジェクトはロボット産業振興会議の「ロボット開発技術強化事業」(平成 16, 17 年度)として行われたものであり、資金の支援とともに日頃の御指導に対して記して感謝する。

文 献

- (1) T. Kanda, H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, T. Maeda and R. Nakatsu : “Development of “Robovie” as Platform of Everyday-Robot Research”, Trans. of IEICE, Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380-389 (2002) (in Japanese)
神田 崇行, 石黒 浩, 小野 哲雄, 今井 倫太, 前田 武志, 中津 良平,

- “研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット “Robovie” の開発,” 信学論 (D-I), Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380–389 (2002)
- (2) H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, T. Isozumi, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, K. Yokoyama, H. Hanada, Y. Fukase, J. Maeda, Y. Nakamura, S. Tachi and H. Inoue : “Humanoid robotics platforms developed in HRP”, Robotics and Autonomous Systems, No.48, pp.165–175 (2004)
- (3) K. Sato, M. ISHII and H. Madokoro : “Experiment and Evaluation on Patrol Robot System for Hospital”, Trans. of IEICE, Vol. J84-D-I, No. 6, pp. 855–866 (2004) (in Japanese)
佐藤 和人, 石井 雅樹, 間所 洋和, “院内巡回ロボットシステムの開発と評価実験,” 信学論 (D-I), Vol. J84-D-I, No. 6, pp. 855–866 (2001)
- (4) T. Kamimiya, H. Kimura, T. Misawa, H. Nambo and Y. Nakano : “Owner Distinction Method for Healing-Type Pet Robot”, Trans. of IEICE, Vol. J86-D-I, No. 6, pp. 412–420 (2003) (in Japanese)
上宮 崇, 木村 春彦, 参沢 匡将, 南保 英孝, 中野 康英, “癒し型ペットロボットの飼い主判別手法,” 信学論 (D-I), Vol. J86-D-I, No. 6, pp. 412–420 (2003)
- (5) K. Severinson-Eklundh, A. Green and H. Hüttenrauch : “Social and collaborative aspects of interaction with a service robot”, Robotics and Autonomous Systems, No. 42, pp. 223–234 (2003)
- (6) Y. T. Chin, H. Wang, L. P. Tay, H. Wang and W. Y. C. Soh : “Vision Guided AGV Using Distance Transform”, Proc. of 32nd ISR, pp. 19–21 (2001)
- (7) L. Matthies, Y. Xiong, R. Hogg, D. Zhu, A. Rankin, B. Kennedy, M. Hebert, R. Maclachlan, C. Won, T. Frost, G. Sukhatme, M. McHenry and S. Goldberg : “A protable, autonomous, urban reconnaissance robot”, Robotics and Autonomous Systems, No. 40, pp. 163–172 (2002)
- (8) D. Ratner and P. McKerrow : “Navigating an outdoor robot along continuous landmarks with ultrasonic sensing,” Robotics and Autonomous Systems, No.45, pp.73–82 (2003)
- (9) T. Kondo, K. Tanaka, F. Ohkawa, T. Nishida and M. Oya : “Development of Weeding Robot System”, Proc. of ISBS2004, Part V Robotics and Motion Control, pp. 27–31 (2004)
- (10) D. Sun, J. Zhu, C. Lai and S. K. Tso : “A Visual Sensing Application to a Climbing Cleaning Robot on the Glass Surface”, Mechatronics, Vol. 14, pp. 1089–1104 (2004)
- (11) S. Birchfield and C. Tomasi : “Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo”, International Journal of Computer Vision, Vol. 35, No. 3, pp. 269–293 (1999)
- (12) D. P. Huttenlocher, R. H. Lilien and C. F. Olson : “View-Based Recognition Using an Eigenspace Approximation to the Hausdorff Measure”, IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, Iss.9, pp. 951–955 (1999)
- (13) 斎藤 恒雄 : 画像処理アルゴリズム, 近代科学社 (1993)
- (14) M. Uenohara and T. Kanade : “Use of Fourier and Karhunen-Loeve Decomposition for Fast Pattern Matching With a Large Set of Templates,” IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 19, No. 8, pp. 891–898 (1997)
- (15) Gray R. Bradski : “Computer vision face tracking as a component of a perceptual user interface”, In Workshop on Applications of Computer Vision, pp. 214–219 (1998)
- (16) Y. Fuchikawa, T. Nishida, S. Kurogi, T. Kondo, F. Ohkawa, T. Suehiro, Y. Watanabe, Y. Kawamura, M. Obata, H. Miyagawa and Y. Kihara : “Development of a Vision System for an Outdoor Service Robot to Collect Trash on Streets”, Proc. of the Eighth IASTED CGIM, pp. 100–105 (2005)
- (17) T. Kondo, T. Nishida, M. Obata and F. Ohkawa, : “A Research Report about The Outdoor Service Robot OSR-01”, Proc. of ICDES2005, pp. 271–275 (2005)

小畑 昌之 (非会員) 1977年生。2001年3月佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻博士前期課程修了。同年(株)安川電機入社。2002年安川情報システム(株)。現在、同技術本部コンポーネントファクトリー所属。研究用途ロボットの開発などを経て、コンピュータビジョンの研究に従事。日本ロボット学会の会員。



西田 健 (正員) 1974年生。2002年3月九州工業大学大学院工学研究科設計生産工学専攻博士後期課程修了。同年同大学工学部助手。ニューラルネットワークやパターン認識、制御工学に関する研究に従事。博士(工学)。電気学会、電子情報通信学会、日本神経回路学会、計測自動制御学会の会員。



宮河 秀和 (非会員) 1963年生。1986年3月法政大学機械工学科卒業。同年(株)安川電機入社。2002年安川情報システム(株)。現在、同技術本部コンポーネントファクトリー研究開発担当部長。工学博士。メカトロニクスの振動制御の研究を経て、コンピュータビジョンの研究に従事。情報処理学会、精密工学会の会員。



近藤 隆史 (非会員) 1981年生。2004年3月九州工業大学情報工学部卒業。現在同大学博士前期課程所属。主としてシステム統合および制御に関する研究に従事。



大川 不二夫 (非会員) 1945年生。1971年3月九州工業大学大学院工学研究科修士課程制御工学専攻修了。同年九州工業大学工学部助手。同大学助教授を経て1991年同大学情報工学部助教授, 1994年教授, 現在に至る。制御理論およびその応用, 特にメカトロ系への応用に関する研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会の会員。

