

## マルチ移動ロボット環境における衝突回避のための 局所的な通信を利用したセンサシステムの開発\*

鈴木昭二\*<sup>1</sup>, 新井義和\*<sup>2</sup>, 琴坂信哉\*<sup>3</sup>  
浅間 一\*<sup>4</sup>, 嘉悦早人\*<sup>4</sup>, 遠藤 勲\*<sup>5</sup>

### Development of an Infrared Sensory System with Local Communication Facility for Collision Avoidance of Multiple Mobile Robots

Sho'ji SUZUKI, Yoshikazu ARAI, Shin'ya KOTOSAKA,  
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Isao ENDO

In this paper, we propose a method for detecting both robots and obstacles using a local infrared communication system. If every robot in the environment has its own ID number and transmits it, then a robot can detect another robot by receiving the ID number. The robot can also detect an obstacle by receiving its own ID number which is reflected from the obstacle. We also propose a method for detecting interference in transmission when several robots transmit to one robot. Finally, we describe the development of a sensor system named LOCISS (locally communicable infrared sensory system) and fundamental experiments carried out to evaluate its performance.

**Key Words:** Robot, Mobile Robot, Sensor, Collision Detection, Infrared Communication, Local Communication, Obstacle Detection, Interference Detection

#### 1. 諸 言

移動ロボットの行う作業には、建物内の清掃や荷物運搬などのように、複数のロボットが分担することにより効率良く実行できるものが多い。複数のロボットが作業を行うマルチ移動ロボット環境下において、それぞれのロボットが作業を効率良く進めるためには、他のロボットや障害物との衝突を回避することが欠かせない<sup>(1)</sup>。

ロボット同士の衝突回避を実現するためには、まず、地理的に近いロボット同士がお互いの存在を検出できなければならない。その上でそれぞれが回避行動を決定するために、進行方向や速度等の移動に関する情報を獲得できる必要がある。従来は、ロボット同士の検出や情報獲得の手段にはセンサと通信とが用いられてきている。

センサを用いた場合、ロボットを検出することは可

能であるが移動に関する情報を獲得することは難しい。また、超音波等を利用した能動形のセンサにはセンサ同士が干渉するという問題がある。例えば、石川ら<sup>(2)</sup>は、ソナーリングを利用した移動障害物の回避を実現しているが、この手法は超音波センサを搭載するロボットが複数存在する場合には適用できない。干渉を起こさないロボットの検出方法として、新井ら<sup>(3)</sup>は看板と視覚を用いた手法を提案しているが、移動に関する情報を獲得するための視覚のキャリブレーションと画像処理にコストがかかる。

ロボット同士の検出と移動に関する情報の獲得は、センサよりも通信を用いた方が容易である。Premvutiら<sup>(4)</sup>や尾崎ら<sup>(4)(5)</sup>は、無線通信を利用して通路の使用予定や位置等の情報を交換することによりロボットが衝突を回避する手法を提案している。しかし、無線通信は通信範囲が広く大域的な通信であるため、ロボットの数が増えるに従って通信負荷が増大するという問題がある。衝突が環境内の一部のロボット、すなわち地理的に近いロボット同士により引き起こされる点を考えると、衝突回避のための情報交換には局所的な通信の方が有利である。

以上の問題を考慮し、著者らは、赤外線通信を用いてロボットと障害物の存在を検出する手法を提案す

\* 原稿受付 1996年3月21日。

<sup>1</sup> 正員、大阪大学工学部(☎565 吹田市山田丘2-1)。

<sup>2</sup> 埼玉大学大学院(☎338 浦和市下大久保255)。

<sup>3</sup> 正員、ATR人間情報通信研究所(☎619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2)。

<sup>4</sup> 正員、理化学研究所(☎351-01 和光市広沢2-1)。

<sup>5</sup> 理化学研究所。

る<sup>(7)</sup>。赤外線は、発光強度を変えることにより到達範囲を一定の距離に限ることができ、容易に局所的な通信を実現できる。しかし、赤外線通信には、赤外線同士が干渉した場合に情報交換が行えないという問題がある。そこで、著者らは送信情報の符号化を工夫し、干渉が発生した場合にこれを検出する手法も併せて提案する。

従来、移動ロボット用の赤外線通信システムは、福田ら<sup>(9)</sup>、市川ら<sup>(10)</sup>、小山ら<sup>(8)</sup>によっても提案されてきている。これらの研究では局所的な通信機能を利用して、特別な機能を持つセルの発見と情報交換の実現<sup>(9)</sup>や複数のロボット間を伝搬することによる情報伝達の実現<sup>(8)(10)</sup>などが行われてきた。しかし、これらのシステムでは複数のロボットが密集した場合に起こる赤外線の干渉に対する検討は行われていない。

本稿では、赤外線通信を用いてロボットと障害物の存在を検出する原理について述べるとともに、干渉の検出方法を提案する。また、提案した原理に基づいて赤外線通信センサシステム(LOCally Communicable Infrared Sensory System: LOCISS)を開発し、その基本性能を調べ有効性を検討する。

## 2. 赤外線通信を利用したロボットと障害物の検出方法

**2.1 検出の原理** 送受信の基本単位(以下、送受信ユニットと呼ぶ)は、赤外線の発光素子と受光素子を用い赤外線が床面に対して平行に一定の高さで発光するように構成する(図1)。また、発光素子と受光素子の光軸の方向は一致させる。このとき、赤外線の発光強度と発光素子と受光素子の指向性により、送受信ユニットの通信可能な範囲が決まる。

環境内のすべてのロボットが赤外線通信センサシステムを持つと仮定する。各ロボットは、それぞれ固有の識別番号を持ち、これをロボット識別番号(ID number of robot)と呼ぶこととする。各ロボットは、常に自分のロボット識別番号を送信しながら同時に受信情報のチェックを行いつつ移動する。

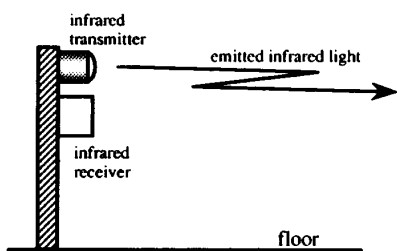
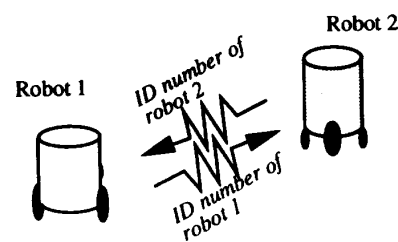


Fig. 1 The configuration of infrared devices

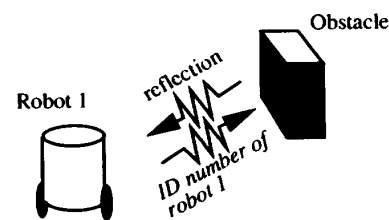
このとき、ロボットは受信したロボット識別番号により、他のロボットと障害物の存在を検出することができる(図2)。すなわち、通信可能な範囲内に別のロボットが存在する場合には、自分と異なるロボット識別番号を受信するため、これによりそのロボットの存在を検出することができる。また、障害物が存在する場合には、自分の発した赤外線が反射して戻ってくることから自分自身のロボット識別番号を受信し、このことにより障害物の検出が可能となる。ロボットおよび障害物の検出できる範囲は送受信ユニットの通信可能な範囲により決定されるため、これを考慮して送受信ユニットを複数配置することにより全方位にわたる検出が可能となる。

ここで、各送受信ユニットに一意的な番号を与える。この番号は、送受信ユニットの光軸の方向とロボットの進行方向のなす角に応じて定める(著者らの開発したシステムでは図6のように定めている)。この番号を方向識別番号(ID number of direction)と呼ぶことにする。この方向識別番号をロボット識別番号とともに送信することにより、通信を行ったロボット同士はお互いの進行方向の関係を認識することができる。すなわち、受信側のロボットが受信を行った送受信ユニットの方向識別番号と受信した相手のロボットの方向識別番号の組合せは、ロボット同士の進行方向の組合せと一対一に対応する。こうして得られた進行方向の情報により、ロボット同士は、近付きつつあるのか遠ざかりつつあるのかを判断することができ衝突回避行動を決定できる。

**2.2 干渉検出の原理** 通信中の2台のロボットの通信ができなくなるのは、ロボット同士の距離が離



(a) Detection of a robot



(b) Detection of an obstacle

Fig. 2 Detection principles

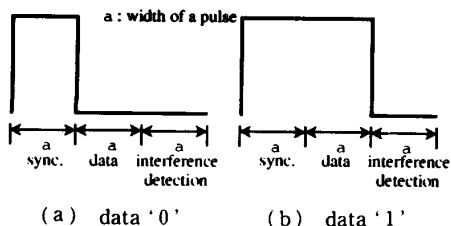


Fig. 3 Encoding of one bit of data

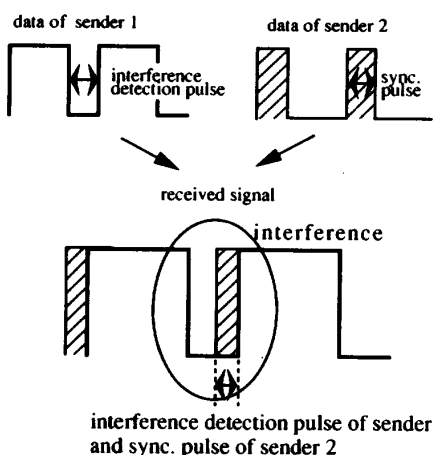


Fig. 4 The principle of interference detection

れ赤外線が届かなくなった場合か、他のロボットが接近し赤外線が干渉した場合と考えられる。ロボットは、これらの場合を区別して認識しなければならない。著者らは、赤外線の干渉の発生を検出することによりこれが可能になると考え、干渉の検出のための冗長な信号を付加した送信データの符号化を提案する。

送信データは2値化し、1 bit を一定幅のパルスのON/OFFで表すこととする。このパルスの前後に同じパルス幅のパルスを付加し、データの1 bit を3つのパルスにより表す(図3)。1番めはONのパルスを用いデータ受信の同期パルスとする。2番めはデータで'1'のときはONのパルス、'0'のときはOFFのパルスを用いる。3番めはOFFのパルスを用い、これを干渉検出パルスとする。したがって、送信データは同期パルス、データ、干渉検出パルスをひとまとまりとしたものが集まって構成される。データの受信は、周期的に現れるこれらのパルスを観測することにより行う。このとき、送信側との距離が遠すぎる場合には、同期パルスやデータのパルスを受信しにくくなり、受信信号にはOFFのパルスが増えると考えられる。

干渉が発生した場合には、受信側では複数の送信信号が重なり合った信号が観測される。このとき、一つの送信信号に含まれる同期パルスは、別の送信信号の干渉検出パルスと重なる(図4)。そのため受信信号上

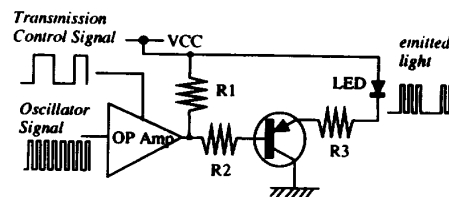


Fig. 5 The transmission circuit

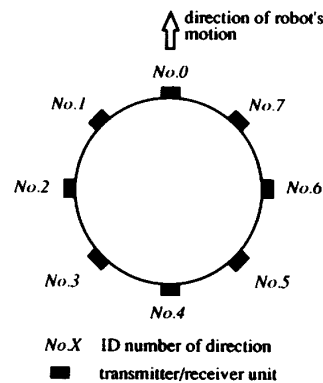


Fig. 6 The configuration of transmitter/receiver units

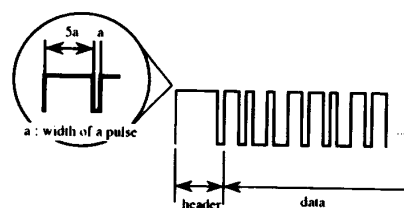


Fig. 7 Encoding of the header

では、干渉検出パルスのOFFであるべき時間が短くなる。したがって、これを観測することにより干渉の発生を検出することができる。

### 3. センサシステムの開発

**3.1 送受信ユニットの構成** 赤外線による通信は太陽光や照明等の外光が雑音となる。これに対処するため、テレビの赤外線リモコンと同様に 38 kHz の周波数で変調した赤外線<sup>(11)</sup>を伝送媒体として用いた。送信部には赤外発光ダイオードを用い、図5に示す回路を設計し発光の制御を行った。赤外線の到達距離は、著者らのロボットの移動速度 0.3 m/s を考慮し 1.2 m とした。この距離は回路中の抵抗の値により調整できる。受光部には市販のリモコン用受光素子を用いた。

なるべく少ない数の送受信ユニットで全方位の検出を実現するために、発光素子と受光素子はおおよそ 45° の指向性を持つものを選択した(発光素子には SHARP GL537 を、受光素子には SHARP IS1U60 を用いた)。これにより、8組の送受信ユニットで全方

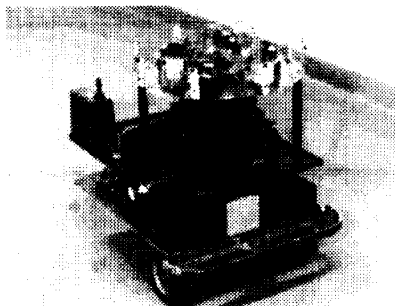


Fig. 8 The developed sensor system on a robot

位の検出を実現できる。開発した赤外線通信センサシステム上の送受信ユニットの配置を図6に示す。各送受信ユニットから送信する方向識別番号は、それぞれ図6のように定めた。

**3・2 送信データの符号化** 送信するデータはロボットに与えられたロボット識別番号と、センサシステムのそれぞれの送受信ユニットに定められた方向識別番号とした。送信データはヘッダを付加しフレームを形成した上で2・2節に述べた方法で符号化する(図7)。ヘッダにより、受信側ではデータの区切りを発見しやすくなる。また、干渉が発生した場合は一方の送信データのヘッダ部分と別の送信データの干渉検出パルスが重なる可能性があり、ヘッダは干渉検出にも有効である。

**3・3 センサ制御部の構成** 市販のZ80マイコン・ボード(秋月電子 AKI-80 12M を使用した)を送受信のコントローラとして用いた。1組のコントローラで2組の送受信ユニットの制御を行うこととし、センサシステム中の8組の送受信ユニットは4組のコントローラで制御を行う。送信データの符号化と受信信号の解析のためのプログラムはアセンブラで記述した。

作成したプログラムでは、データを構成する1パルスの幅を  $630 \mu\text{s}$  として送信を行う。このパルス幅は使用したマイコン・ボードの処理能力に合わせて定めた。その結果、ヘッダの送信には  $3.78 \text{ ms}$ 、1 bit 当たりのデータ送信には  $1.8 \text{ ms}$  かかり、ヘッダ付きの1 byte データの送信時間はおおよそ  $18.18 \text{ ms}$  となった。また、受信信号の解析は送信時の1パルスの半分の間隔(ここでは  $315 \mu\text{s}$ )で行う。

受信に関しては以下の4通りの通信状態があり、これらはロボットの位置関係と対応している。

(1) 全く信号を受信していない状態(no signal) :

通信範囲内には1台もロボットが存在せず、受信信

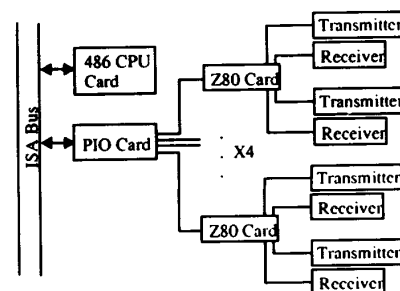


Fig. 9 The architecture of the sensor controller

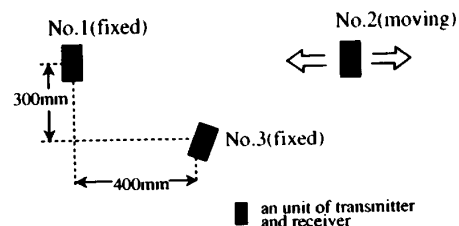


Fig. 10 Experiment of interference detection

号が全くない場合。

(2) データを正しく受信している状態(correct data & wrong data) :

1台のロボットが通信範囲内にいる場合、元の送信データを正しく受信する場合(correct data)と、受信したデータが雑音等の影響により元の送信データと異なる場合(wrong data)がある。

(3) 信号を受信しているがデータを復号できない状態(frame error) :

1台のロボットが通信範囲のすぐ外側にいる場合、ロボット同士の距離が離れすぎて相手に届く赤外線が弱いために、受信信号はあるがフレームの識別ができない。

(4) 干渉が発生している状態(interference) :

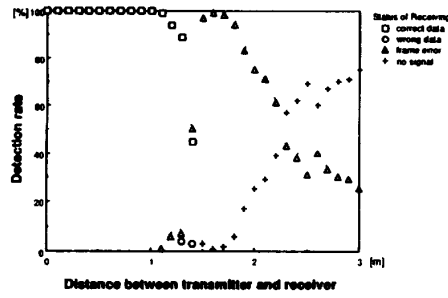
2台以上のロボットが通信範囲内に存在する場合、2・2節で述べた手法により検出する。

作成したプログラムではこれらの判別を行う。

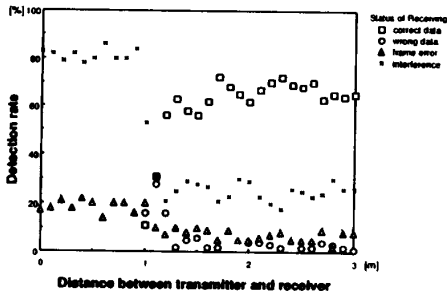
図8には試作したセンサの写真を示す。今回センサを搭載したロボットのコントローラにはPC互換機が利用されており、インテルの486を搭載したCPUボードにリアルタイムOS VxWorksが搭載されている。ロボットのコントローラとセンサのコントローラとはパラレルI/O(PIO)により接続した。ロボットシステムとの接続を含めたセンサの制御系の構成を図9に示す。

#### 4. 基本性能の評価

開発した赤外線通信センサシステムの基本性能に関



(a) Case of 1 sender



(b) Case of 2 senders

Fig. 11 Detection of communication status

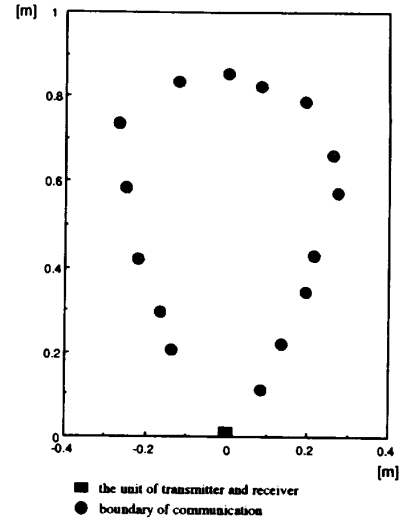
して、干渉の検出を含む通信状態の判別能力と他のロボットおよび障害物の検出範囲を調べた。送信データは、ロボット識別番号と方向識別番号を8bitで表し符号化したものを用いた。

**4.1 干渉の検出を含む通信状態の判別** 2組の送受信ユニットを向かい合せて配置し、一方を送信もう一方を受信に用いた。受信側を固定し、送信側を0.1mずつ動かすことによりユニット間の距離を変化させた。このとき、受信側のロボットコントローラ上で各距離ごとに0.5s間隔で100回ずつ受信データを読み取り通信状態の判別を行った。

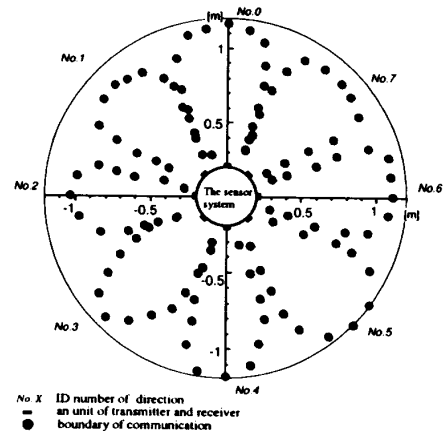
各距離で通信状態の判別された割合を図11(a)に示す。この図より、送信側のユニットとの距離に応じて判別される通信状態が、データを受信している状態、データを復号できない状態、信号を受信しない状態と変化することがわかる。また、データを受信できる範囲は、3.1節で設定した赤外線の到達距離とほぼ一致することがわかる。

次に、3組の送受信ユニットを用いて干渉検出の実験を行った(図10)。先の実験の受信側のユニットの近くに送信用ユニットを追加する(図10中のNo.3)。この状態で、先の実験同様に送信側のユニット(図10中のNo.2)を0.1mずつ動かす、受信データの観測を行った。ここでも、各距離ごとに0.5s間隔で100回ずつ受信データを読み取った。

判別された通信状態の割合を図11(b)に示す。図よ



(a) One transmitter/receiver unit

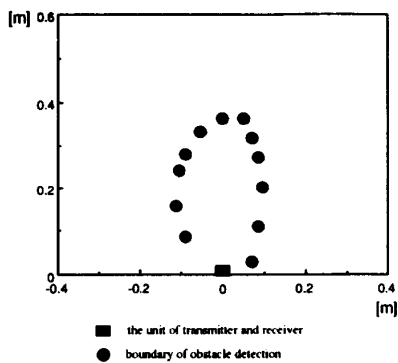


(b) The developed sensor system

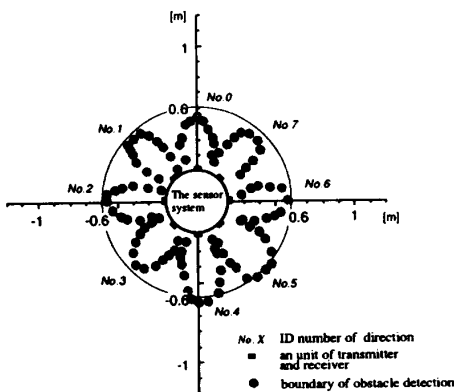
Fig. 12 Communication range

り、移動する送信ユニットとの距離に応じて判別される通信状態が、干渉が発生している状態からデータを受信している状態へと変化することがわかる。また、干渉が発生する範囲は、3.1節で設定した赤外線の到達距離とほぼ一致することがわかる。

以上から、通信状態は送信ユニットとの距離に応じて変化し、この判別はロボットが周囲の状況を判断する上で有効な情報となりうることを示された。しかし、図11(a)においては、信号を受信するがデータを復号できない状態が送受信ユニットの距離2m以上でも判別され、期待される通信状態の判別割合が100%とはならない。図11(b)においても、1m以上の距離でも干渉が判別されている。この原因としては、赤外線到達距離を超えても全く信号が届かなくなるわけではないことや、蛍光灯等の外乱光などによる雑音の発生が考えられる。雑音の影響を軽減し判別割合を向上するためには、センサのコントローラをより高性能にし



(a) One transmitter/receiver unit



(b) The developed sensor system

Fig. 13 Range of obstacle detection

3・3節で設定した受信時の信号読取りの間隔を短くする必要があるのであろう。また、ロボットの状況判断時に通信状態判別の履歴を利用するなどの処理が必要であらう。

**4・2 他のロボットの検出範囲の測定** 開発したセンサシステムを固定し、これとは別に1組の送信ユニットを用意する。送信ユニットを動かしながら受信データの観測を行い通信可能範囲を測定した。通信可能範囲は他のロボットの検出範囲と等価である。固定したセンサシステム中の1組の送受信ユニットにおける測定結果を図12(a)に示す。図中の点は連続して受信した10個のデータが10個とも送信データと等しい領域の境界を示す。

開発したセンサシステムの通信範囲を図12(b)に示す。ここで、送受信ユニットごとに通信範囲が微妙に異なるのは、発光素子と受光素子の性能のばらつきが原因であると考えられる。実験の結果、本センサシステムは約1.0 mから1.2 mの距離(ただし、センサシステム自体の大きさを含む)でほぼ全方位360°の範囲で受信可能であることが確かめられた。したがって、この範囲に同じシステムを持つ別のロボットが近付けばロボット識別番号を認識することにより、そのロボ

ットの存在を知ることができる。

**4・3 障害物の検出** 通信範囲の測定同様センサシステムを固定し、送信ユニットの代わりに障害物を動かすことにより障害物の検出範囲を測定した。障害物としてA4サイズの白紙を用い、これをセンサに正対させながら動かした。先の実験同様連続して受信した10個のデータを送信データと比較し100%同じデータが受信できる範囲を観測した。センサシステム中の一組の送受信ユニットの障害物検出範囲を図13(a)に示す。図中の点が検出範囲の境界である。

開発したセンサシステムの障害物検出範囲を図13(b)に示す。ここでも、先の実験同様、素子のばらつきによる検出範囲の差が生じている。実験の結果、約0.4 mから0.6 m以下の距離(ただし、センサシステム自体の大きさを含む)であればどの方向に存在する障害物も認識することができ、本システムが近接センサとして利用可能であることが確かめられた。通信可能範囲に比べて障害物検出範囲が狭いのは、反射光が直接光に比べて弱いためであると考えられる。

## 5. 結 論

本稿では、移動ロボットの衝突回避のための赤外線通信を利用したロボットと障害物の検出方法について述べた。また、提案した方法に従って赤外線通信センサシステムを作成しその基本性能を調べた。実験の結果、作成したシステムは障害物に対する近接センサとしても局所的な通信を利用したロボット同士の検出にも利用できることを確認した。また、複数のロボットからの送信が干渉した場合の干渉の検出方法を提案し、実際に検出が可能であることを確かめた。

マルチ移動ロボット環境において衝突を回避するためには、(1)静止した障害物の検出、(2)移動する障害物の検出、(3)他のロボットの検出が必要となる。著者らの開発したセンサシステムは、このうち(1)と(3)を検出でき、ロボットの衝突回避能力を向上させるためのセンサとして有効である。

本稿では、開発した赤外線通信センサシステムが、マルチ移動ロボット環境下でのロボットのセンサシステムとして高い能力を持ち、幅広く応用できる可能性のあることを示した。今後の課題としては、センサ情報の履歴や他のセンサ情報を融合したロボットの状況判断能力の実現を考えていく必要がある。また、さらなる性能の向上のためのコントローラの開発とさまざまなアプリケーションへの応用も今後の課題である。

**謝辞** 本システムの開発に当たり協力して下さった鈴茂器工(株)の上垣晃氏、東洋大学工学部助教授松元

明弘氏, 宇都宮大学工学部助手の尾崎功一氏に感謝する。

### 文 献

- (1) 浅間一, 複数の移動ロボットによる協調行動と群知能, 計測と制御, **31-11** (1992), 1155-1161.
- (2) 石川繁樹・浅香俊一, 移動障害物を含むような動的変化を伴う走行環境における自律移動ロボットの走行誘導方式, 日本ロボット学会誌, **11-6** (1993), 856-867.
- (3) 新井民夫・木村久幸・ほか3名, 移動ロボット相互の位置・姿勢実時間計測システムの開発, 日本ロボット学会誌, **12-3** (1994), 472-478.
- (4) 浅間一・尾崎功一・ほか4名, 通信及びルールに基づく複数の移動ロボットの衝突回避, 第1回日本ロボット学会ロボットシンポジウム予稿集, (1991), 73-78.
- (5) 尾崎功一・浅間一・ほか3名, 自律分散型ロボットシステムのための無線通信システムの開発, 精密工学会誌, **61-8** (1995), 1137-1140.
- (6) Yuta, S. and Premvuti, S., Coordination of Autonomous and Centralized Decision Making to Achieve Cooperative Behaviors between Multiple Mobile Robots, *International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '92*, (1992-7), 1566-1574.
- (7) 鈴木昭二・新井義和・琴坂信哉・浅間一・嘉悦早人・遠藤勲, 移動ロボットの協調のための赤外線センサ通信システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, (1995), 824-827.
- (8) 小山峰乙・吉田英一・太田順・新井民夫, 赤外線を用いた移動ロボット間局所通信システムの実現, 1995年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1995), 185-186.
- (9) 福田敏男・川内陽志生・ブス, マーチン・浅間一, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第3報, セル構造化ロボット"CEBET"の認識, 通信システム), 機論, **56-523, C** (1990), 709-716.
- (10) 市川純章・原文雄・細貝英美, 呼びかけ通信を利用した群ロボットの協調的経路探索行動の研究~ロボット相互の衝突の影響を考慮した群行動の特性~, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演論文集, (1993), 919-923.
- (11) 藤方保裕・小林光裕, 赤外線発光/受光素子の使い方, トランジスタ技術, (1995-6), 244-253.