

自律移動ロボット搭載用ステレオビジョンシステムの開発

本間 稔規, 吉川 毅, 橋場 参生, 鈴木 慎一
澤山 一博

Development of Stereo Vision System for Autonomous Mobile Robot

Toshinori HONMA, Takeshi KIKKAWA, Mitsuo HASHIBA, Shinichi SUZUKI
Kazuhiro SAWAYAMA

抄 録

人と共存する環境で使用を想定される自律移動ロボットに搭載可能なステレオビジョンシステムを開発した。本システムは 1) センサと機構駆動系で構成するセンサ機構部, 2) センサ機構部の制御を行うマイコンで構成する機構制御部, 3) 画像処理・認識等を行うデータ処理部 で構成される。センサ機構部は左右に配置した 2 組のセンサブロックで構成している。それぞれのセンサブロックには CCD カメラと焦電型赤外線センサを搭載しており, これらのセンサブロックの輻輳角を制御することが可能である。本システムを搭載する自律移動ロボットは, 福祉施設において介護者を追走し, 荷物運搬などの作業補助を行うことを想定している。今回は, 本システムを用いた介護者(人体)の検出・追尾, および障害物の認識を行う手法, さらに本システムをロボットに搭載して行った評価試験について報告する。

キーワード: ステレオビジョン, 自律移動ロボット, 人検出・追尾, 環境認識

1. はじめに

少子高齢化社会に伴い, 高齢者などの被介護者人口よりも介護者人口の方が少なくなることが懸念される。すなわち, 介護者一人あたりの被介護者数が多くなるため, 介護者の労働負担が増加し, 細やかなサービスが行えなくなる状況が予想される。介護者の仕事として被介護者と直に接する介護作業と, それ以外の掃除や荷物運搬などの日常作業がある。本研究では, これらの日常作業のうち, 荷物運搬などについて自律移動ロボットを用いて補助することにより, 介護者の労働負担を軽減させることを目的としている。

自律移動ロボットの荷物運搬の作業補助の形態として,

- 1) ロボットが自律的に移動して単独で作業を行う場合
- 2) 介護者の後を追走して運搬作業を行う場合

を想定した。本研究では 2) の介護者を追走して作業を行う場合に必要な機能について検討した。この場合において, ロボットに必要な機能は, 介護者(人間)を発見して追尾すること, また追走時にロボットの移動に支障のある障害物を回避するなどの環境認識である。これらの機能を実現するために図 1 に示すステレオビジョンシステムを開発した。このよ

うな視覚システムは, 人間や動物などが外界の情報を得るために視覚が大きな役割を果たしていることを考えると大変重要である。

ロボットが環境内から介護者を発見するということは, 介護者とそれ以外のものを区別するということである。区別するためには介護者についての特徴など, 前提としてなんらかの知識を持っている必要がある。一般に, CCD カメラからの画像だけを用いて介護者を実時間で識別することは難しい

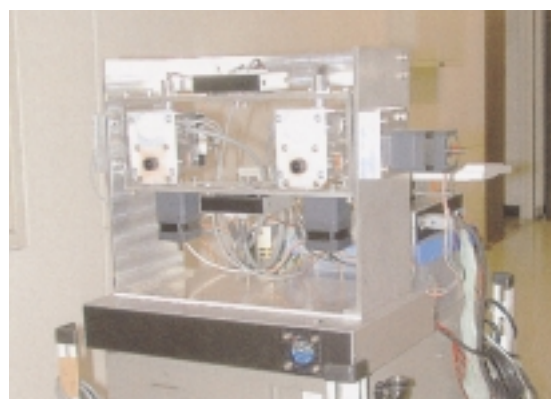


図1 ステレオビジョンシステム

ため、ここでは介護者（人）の体温と背景の温度との差を検出することにより介護者の位置を求め、その位置を注視点として2台の CCD カメラを向けることにより介護者を認識し、追尾を行う。

また、介護者を追走して運搬作業を補助する場合、追尾動作を行う他に、障害物回避を行うための環境認識などの自律性が必要である。ここではロボットの移動環境が屋内のフラットフロアであることから、移動可能な領域として進行方向の床を検出することによって障害物を回避することとし、以下この方法について述べる。

2. ステレオビジョンシステム

ステレオビジョンシステムのセンサ機構部を図2に示す。センサ機構部は焦電型赤外線センサ（スポットタイプのフレネルレンズ付き）とボード型カラー CCD カメラを一つのセンサブロックとし、これを水平に2つ配置した構造である。これらのセンサブロックはそれぞれ水平方向（パン方向）と垂直方向（ティルト方向）の回転自由度を持つ。センサブロ

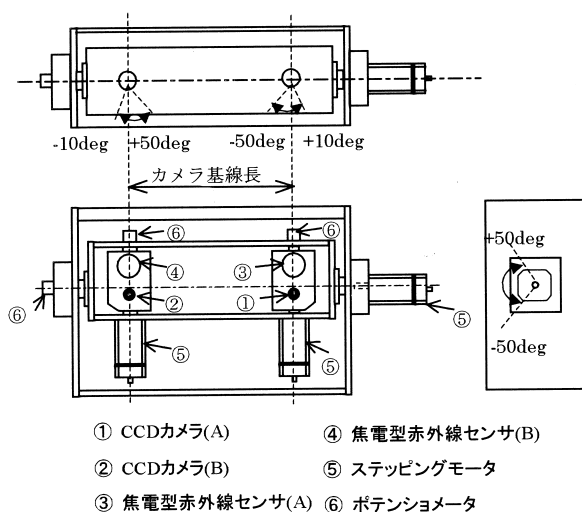


図2 ステレオビジョンシステム（機構部）

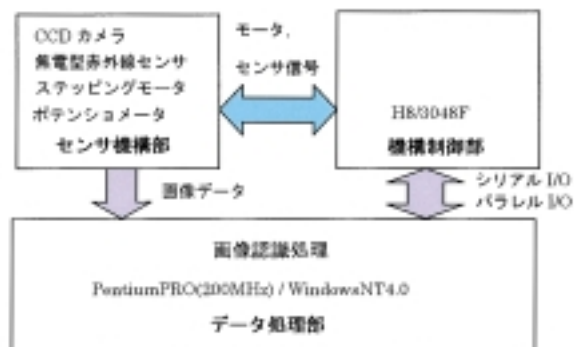


図3 ステレオビジョンシステム構成

ックは各軸に取り付けられたステッピングモータで姿勢を変化させることが可能であり、その姿勢は同軸上に取り付けられているポテンシオメータを用いて計測する。

図3にステレオビジョンシステムの構成を示す。センサ機構部のステッピングモータ用の駆動パルス、および焦電型赤外線センサ、ポテンシオメータからのアナログデータの収集とA/D変換を機構制御部で行う。また、CCDカメラからの画像の処理・解析、センサデータの処理、ステッピングモータ駆動データの生成をデータ処理部で行う。

3. 人体検出・追尾方法

本研究では、ゼロ視差フィルタ法¹⁾を用いて移動物体を追尾する方法を提案する。本手法を用いるに際して、追尾を行う前に追尾する対象を検出する必要がある。追尾する対象は介護者（人体）である。人体には一定の体温（36～37℃）があることを利用し、2つの焦電型赤外線センサで人体を検出し方向を求めた後、その人体方向に2台のCCDカメラの注視点を設定して追尾動作を行う方法を開発した。

3.1 人体検出方法

人体を検出するセンサとして焦電型赤外線センサがよく利用される。焦電型赤外線センサは、センサに入射する赤外線量の変化を電気信号に変換する。このセンサを用いることによって、人の動きにより生じる温度変化をとらえ、人体を検知することができる。しかし、人が静止している場合、つまり温度変化がない場合にはセンサは反応しない。本研究では、静止している人体（以下、静止人体）についても検出可能とするために、図2に示すセンサ機構部の焦電型赤外線センサA、B（③、④）をそれぞれ水平方向に振ることにより、静止人体と焦電型赤外線センサA、Bの相対的な位置を変化させ、人体を検知する方法を開発した（図5）。図6に本手法を用いて静止人体を検出したときの焦電型赤外線センサ

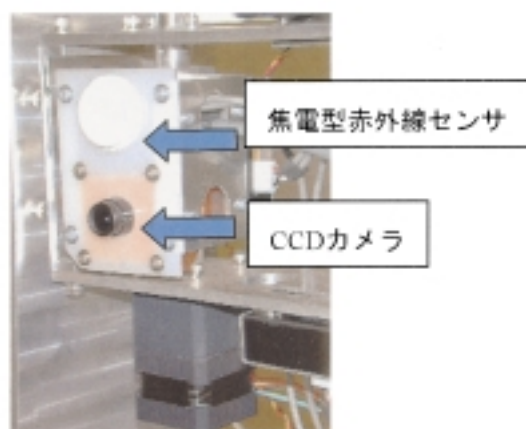


図4 センサブロック

A, B 電圧変化のグラフを示す。人体の温度は背景の温度よりも高いので、センサ光軸が人体を横切ったときに得られる波形は、電圧が最大ピークになってから最小ピークとなるような波形である。この最大ピークが得られる部分の midpoint (図 6 の P_a, P_b) を人体中心とし、このときのポテンシオメータの角度から三角測量の原理により人体位置を求める。

なお、焦電型赤外線センサ A, B は、センサ機構部のセンサブロック (図 4) にそれぞれ一つずつ取り付けられており、前部にはスポットタイプのフレネルレンズ (画角: 5 deg) が装着されている。

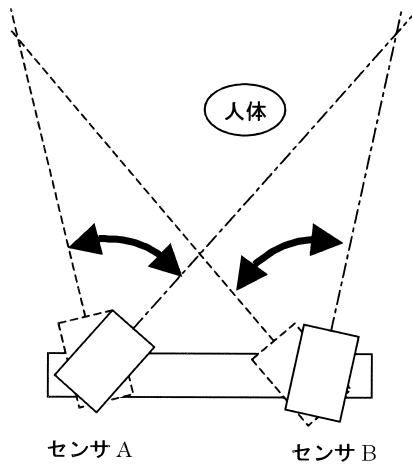


図 5 人体検出方法

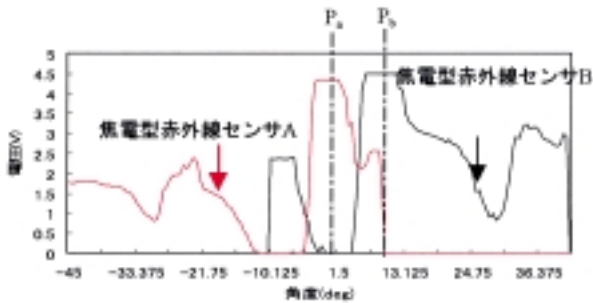


図 6 静止人体検出時のセンサ出力例

3.2 人体追尾方法

焦電型赤外線センサによって人体の方向を求めた後、その人体の方向にそれぞれのカメラの光軸を向ける。そのとき、画像中心付近に人体が撮像される (図 7)。画像処理時間を短縮するために、画像の解像度を 640×480 から 64×48 にサブサンプリングする²⁾。この画像中心の矩形領域の色情報 (カラーヒストグラム³⁾ [B-G, G-R の色差と $(R + G + B)/3$ の画素濃度値ヒストグラム]) を取得し、そのカラーヒストグラムについてそれぞれの画像全体に対して式(1)を用いてマッチングをとる。図 8 に示す処理画像において、マッチングの

評価値 C_h が大きければ明るく、小さければ暗く表される。この左右の CCD カメラで撮像して得られたマッチング画像について画像縦方向に射影をとり、値の大きい x 座標をそれぞれ求める。これらの値から三角測量により人体の位置を計算し、人体が画像中心に撮像されるようにカメラの水平方向の角度を調整する。以上の操作を繰り返すことにより、移動する人体の追尾を行う。

$$C_h = \frac{1}{3} \sum_{c=1}^N \left(\frac{\sum_{i=1}^k (\min(h_{c,ref}(i), h_c(i)))}{\sum_{i=1}^k h_{c,ref}(i)} \right) \dots (1)$$

- C_h : マッチングの評価値
- $h(i)$: 比較するヒストグラム
- $h_{ref}(i)$: 比較されるヒストグラム
- k : 階調数 (=16)
- c : ヒストグラムの種類
- i : ヒストグラムの階調
- $N = 3$

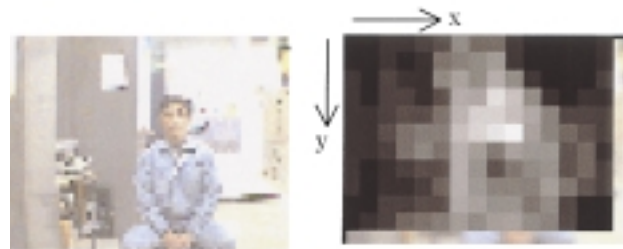


図 7 原画像 (人体)

図 8 処理画像 (人体)

4. 移動可能領域の検出方法

本ロボットの移動可能な領域を段差のない床の上と仮定する。このとき、走行の支障となる障害物は壁や机、椅子などの家具等である。個々の障害物について定義を行うことは場合の数が膨大になるため、現実的ではない。本研究では、障害物を定義することによって障害物を回避するのではなく、移動可能な領域 (床面) を認識することによって障害物回避を行う。

4.1 床面領域の抽出

左右の CCD カメラ光軸の交点 (注視点) がロボットの進行方向前方の床面上になるように設定し、画像を取り込む (図 9)。画像の解像度については、処理を高速化するために、 640×480 から 64×48 にサブサンプリングする²⁾。床領域を抽出するためには細かい線成分等は必要なく、これらの原画像についてガウス関数をたたみ込んで画像を平滑化する。これらについて画像の下端部中心の矩形領域を床領域と仮定する

(図10)。この床領域と仮定した部分について画素特徴量(画素の位置 (x, y) , 色度 (r, g, b) , 画素濃度値 (I))の平均値を求め、この値について、画像に対して式(2)で示す、重み付きユークリッド距離による評価値 l を求める⁴⁾。この評価値 l の値が小さければその画素特徴量は類似していることになり、逆に大きければ類似していないことになる。評価値 l を8ビットで表すことにより処理画像(図11)を得る。図11では評価値 l が小さい(類似している)と暗く、大きい(類似していない)と明るい画素で示される。この画像に対し、二値化処理を行う(図12)。この二値画像について、1画素部分について膨張、収縮処理、および領域拡張処理を用いて障害物領域のみを抽出する。

$$l = \sqrt{k_1 \{(x-x_{ref})^2 + (y-y_{ref})^2\} + k_2 \{(r-r_{ref})^2 + (g-g_{ref})^2 + (b-b_{ref})^2\} + k_3 (I-I_{ref})^2}$$

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad I = \frac{R+G+B}{3} \quad \dots (2)$$

$$x_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad y_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad r_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$$

$$g_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \quad b_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i \quad I_{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i$$

- l : 評価値
- r : 色度(赤成分)
- k_1, k_2, k_3 : 重み係数
- g : 色度(緑成分)
- x : 画像上のx座標
- b : 色度(青成分)
- y : 画像上のy座標
- R : 赤成分の濃度値(0~255)
- N : 矩形領域の面積
- G : 緑成分の濃度値(0~255)
- B : 青成分の濃度値(0~255)
- $i = 1, 2, \dots, N$



図9 原画像

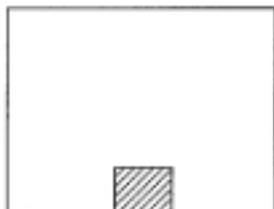


図10 画像における床領域と仮定する部分(斜線部分)



図11 処理画像(8ビット)



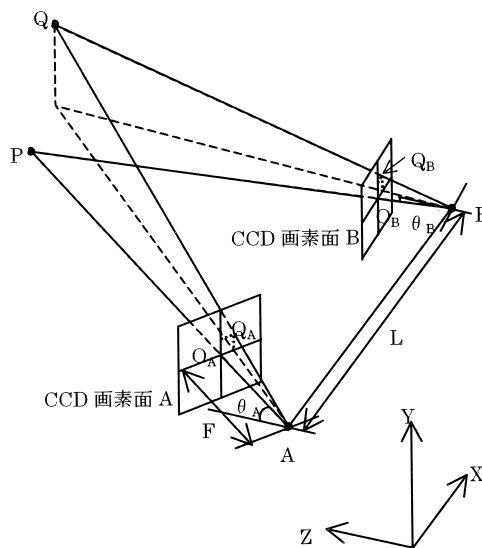
図12 処理画像(二値)

4.2 床面に反射する蛍光灯の認識

床領域を移動可能領域と仮定したとき、床面の反射率が高

いと天井の蛍光灯の反射が問題となる。画像中の蛍光灯の反射は床面の画像特徴とは異なるため、前節の処理では障害物と認識されてしまう。この蛍光灯の反射と通常の障害物を識別するために、二台の CCD カメラに撮像された障害物領域について、それぞれの画像上での位置、面積、カラーヒストグラムを求め、対応する領域ごとに三次元位置を求める。その障害物領域が蛍光灯の床面上での反射であれば、みかけの蛍光灯の位置は床面の下側になるため、識別が可能である。

ここで、ステレオビジョンシステムにおいて3次元位置を求める方法について述べる。図13にシステムの座標系を示す。



- P : 2台のカメラ光軸の交点位置
- Q : 対象物の位置
- O_A : CCD 画素面 A での座標系原点
- O_B : CCD 画素面 B での座標系原点
- Q_A : CCD 画素面 A での対象物の射影点
- Q_B : CCD 画素面 B での対象物の射影点
- θ_A : Z 軸と CCD カメラ A の光軸とのなす角
- θ_B : Z 軸と CCD カメラ B の光軸とのなす角
- L : カメラ基線長
- F : 各カメラの回転軸からの CCD 画素面までの長さから焦点距離を差し引いた長さ

図13 システム座標系¹⁾

図13において、点Pは2台のカメラ光軸の交点位置(注視点)、点Qは対象物の位置 (X, Y, Z) を表す。CCD カメラ A, B の画素面に射影される点Qの座標をそれぞれ $Q_A(x_a, y_a)$, $Q_B(x_b, y_b)$ とすると点Qの座標は以下の式で表される。

$$X = -\frac{L}{2} \frac{x_A x_B \sin(\theta_A + \theta_B) + F(x_A + x_B) \cos(\theta_A + \theta_B) - F^2 \sin(\theta_A + \theta_B)}{x_A x_B \sin(\theta_A - \theta_B) + (x_B - x_A) F \cos(\theta_A - \theta_B) + F^2 \sin(\theta_A - \theta_B)} \dots (3)$$

$$Y = -\frac{y_A L}{F} \frac{x_A x_B \cos \theta_B - F x_A \sin \theta_B + F x_B \cot \theta_A \cos \theta_B - F^2 \cot \theta_A \sin \theta_B}{x_A x_B \sin(\theta_A - \theta_B) + (x_B - x_A) F \cos(\theta_A - \theta_B) + F^2 \sin(\theta_A - \theta_B)} \dots (4)$$

$$Z = -L \frac{(F \cos \theta_A + x_A \sin \theta_A)(F \cos \theta_B + x_B \sin \theta_B)}{x_A x_B \sin(\theta_A - \theta_B) + (x_B - x_A) F \cos(\theta_A - \theta_B) + F^2 \sin(\theta_A - \theta_B)} \dots (5)$$

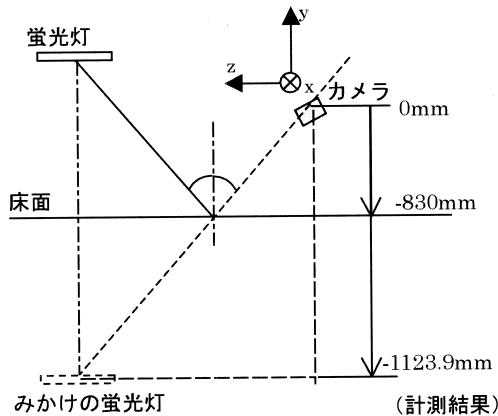


図14 蛍光灯の床面への反射

サ機構部(図2)の基線長中心を原点として

障害物①(-232.6, -859.0, 889.8)

障害物②(385.8, -1123.9, 2532.4)(単位: mm)

と求められた。図14より床面は $y = -830\text{mm}$ であり、障害物対象の位置については画像上での特徴の重心位置で計算しているため10数 mm 程度の誤差が生じることを考慮すると、①は床面上にあるため障害物(缶)であり、②は床面より下にあるため蛍光灯の反射であることが識別できた。

5. 走行実験

5.1 実験システム

実験には AC 電源で稼働する HIRIX-0 (試作 1 号機⁵⁾) を使用した。図19に HIRIX-0の外観を示す。主要諸元を表1に示す。HIRIX-0走行制御用サーボモータのコントローラには NEC 製 PC9801FS (OS: MS-DOS) を使用している。ロボットの走行速度は約0.25m/s (約0.9km/h) である。ステレオビジョンシステムとの通信はシリアルインターフェイス (EIA-232, 通信速度: 9600bps) を用いて行う。走行制御部への通信データは速度, 走行モード (前進, 後進, 旋回), 旋回角度を含む 2 バイトデータで構成する。



図15 原画像 (A: 左)

図16 原画像 (B: 右)

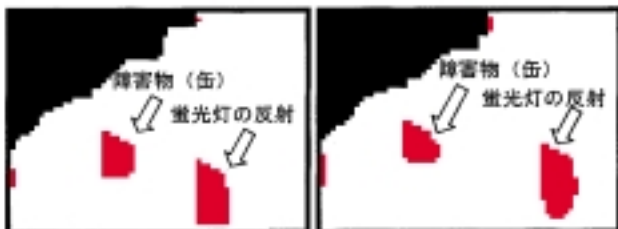


図17 処理画像 (A: 左)

図18 処理画像 (B: 右)



図19 HIRIX-0外観

図15, 図16に床面上の障害物(缶)と, 床面での蛍光灯の反射を左右の CCD カメラで撮影した画像を示す。これらの原画像に対し床領域抽出処理を行い, 床面の画像特徴と異なる領域(障害物領域)を抽出する(図17, 図18)。これらの領域について画像上での位置, 面積, カラーヒストグラムにより二つの画像間での対応を求める。対応の得られた特徴に対し, それぞれ画像上での重心位置を求め, (3), (4), (5)式を用いて 3 次元位置を計算する。それぞれの特徴の位置はセン

5.2 走行制御

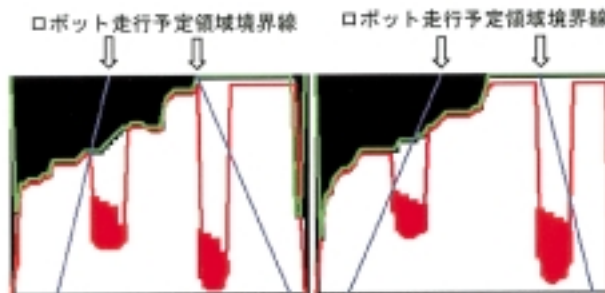
基本的に, ロボットは床領域として抽出される部分を走行可能領域として直進走行する。また, 障害物との衝突を避けるため, 設定した衝突危険距離 D よりも近い距離の範囲, かつロボットの車幅 $+ \alpha$ の範囲(図21のロボット走行予定領域境界線の間)内について, 走行可能でない領域, または障害物があれば旋回, 停止, 後進などの回避行動を行う。回避

表1 実験システム主要諸元

	項目	仕様
センサ機構部	寸法(mm)	290(H)×477(W)×152(D)
	カメラ基線長(mm)	200
	可動範囲(deg)	カメラ A (パン角度) : -50~+10 カメラ B (パン角度) : -10~+50 ベース部 (ティルト角度) : -50~+50
	回転速度(deg/sec)	各軸約 90
	CCD カメラ	1/3 インチカラー CCD ボードカメラ×2 レンズ: f=5.6mm, F=4.0 固定焦点 有効画素数: 510(H)×492(V)
	焦電型赤外線センサ	焦電型赤外線センサ (7μm ロングパス) ×2 フレネルレンズ (画角 5 deg)
	ステッピングモータ	5相ステッピングモータ+ ギア (減速比 1:30) ×3 ハーフステップ角 0.012(deg)
	ポテンシオメータ	無接触角度センサ×3 計測角度範囲: ±50(deg)
機構制御部	マイコン	AKI-H8/3048F マイコンボード ステッピングモータ用 パルス: 約 8kpps
データ処理部	CPU ボード	PICMG 規格
	CPU	PentiumPRO 200MHz
	OS	WindowsNT4.0 WorkStation
	画像入力ボード	640×480(24bit) 最大 3ch 入力可能
走行制御部	PIO ボード	48bit パラレル入出力
	CPU	386SX 20MHz
	OS	MS-DOS
	位置決めボード	独立 3 軸制御可能
	走行モータ	AC サーボ



原画像 (A:左) 原画像 (B:右)
図20 原画像



処理画像 (A:左) 処理画像 (B:右)
図21 処理画像 (障害物)

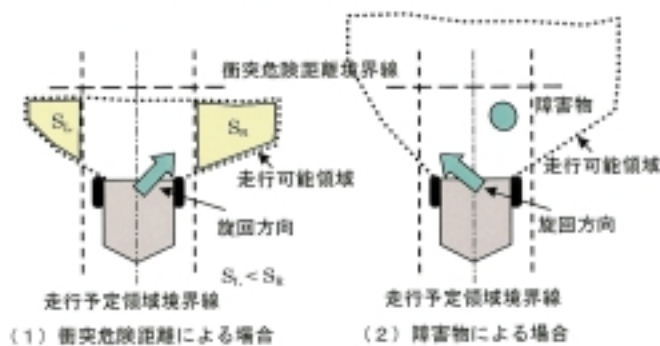


図22 障害物を回避する場合の旋回方向

行動を行う条件は、次の通りである。

- 1) 走行可能領域で直進可能な距離が衝突危険距離 D よりも近い場合、走行予定領域外側の走行可能領域の面積が大きい方へ進むように旋回する (図22(1))。
- 2) 走行可能領域内に障害物領域が存在し、かつ衝突危険距離 D よりも近い場合、その位置がロボット走行予定領域の中心付近にある場合は停止または後進し、中心付近より左右どちらかにずれていれば旋回して障害物を回避する (図22(2))。

5.3 実験結果および今後の課題

工業試験場研究棟 3 階廊下において走行実験を行った。実験項目として、ロボット前方にある人体の位置を検出し、その人体の方向へ走行を行うこととした。まず、2つの焦電型赤外線センサを用いて人体検出を行い、その位置を求める。次に、位置を求めた人体を追尾する処理を行い、人体の方向へ走行を開始する。走行中は床面抽出処理により、障害物検出を行う。人体または障害物がロボットの衝突危険範囲に入ったときにロボットは停止する。以上のような動作実験を行い、良好に動作することを確認した。なお、画像認識に要する時間について、人体の追尾に要する時間は約1000msec (画像処理に約100msec, ステッピングモータ動作時間に約500msec, 画像取り込みに約400msec), 床面抽出処理に要する時間は約900msec (画像処理に約500msec, 画像取り込みに約400msec) であった。

本実験によって、以下の課題が明らかとなった。

- 1) 焦電型赤外線センサを用いた人体検出について、背景温度と人体の温度との差が小さい場合はセンサの出力が小さくなり、検出が困難であった。
- 2) 廊下において、障害物を旋回して回避した場合、CCDカメラの画角に壁しか映らなく、その壁を床であると誤認識してしまうことがあった。
- 3) ステッピングモータ回転中は画像がぶれてしまうため、画像取り込みはモータが停止しているときに行った。このため画像の取り込み間隔が長くなり、全体の処理速度に大きく影響を及ぼした。

それぞれの課題に対する解決方法を以下に示す。

- 1) 焦電型赤外線センサと画像のオプティカルフローを併用する方法について検討を行う。
- 2) 床と壁を識別することが可能なアルゴリズム、または超音波センサを組み合わせた方法などについて検討を行う。
- 3) ステッピングモータに供給するパルス周期の間隔を短くすることにより処理の高速化をはかる。

6. おわりに

人と共存する環境で使用を想定される自律移動ロボットに搭載可能なステレオビジョンシステムを開発した。福祉施設において介護者を追走し、荷物運搬などの作業補助に必要な、介護者（人体）の検出・追尾機能、および障害物の認識を行う手法について検討した。本システムを移動ロボットに搭載して評価試験を行い、上記手法について良好に動作することを確認した。今後は動作速度の高速化および認識のロバスト性の向上を課題として検討を行う所存である。

なお、本研究は平成9年度から平成11年度に実施された産学官共同研究「福祉分野における補助作業用移動ロボットの開発」において行われたものである。

引用文献

- 1) 喜多伸之・S. Rougeaux・國吉康夫・坂根茂幸：仮想ホロボタを用いた実時間両眼追跡，日本ロボット学会誌，13巻5号，pp.683-690，(1995)
- 2) Ian D. Horswill:Specialization of Perceptual Processes,Ph.D thesis,MIT,pp.42-43,(1994)
- 3) Stan Birchfield:Elliptical Head Tracking Using Intensity Gradients and Color Histograms,IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,pp.232-237,(1998)
- 4) 境田 慎一他：K平均アルゴリズムの初期値依存性を利用した統合処理による画像の領域分割手法，信学論(D-II)Vol.J81-D-II No.2，pp.311-322，(1998)

- 5) 吉川 毅ほか7名：視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発，北海道立工業試験場報告，No.295，pp.147-156，(1996)

