

クリエイトを用いた環境認識 (2016年4月13日版)

森本 宜樹^{†1,a)} 吳 海元^{†1,b)} 鈴木 一正^{†1,c)}

概要：本論文では、ロボットの身体形状よりカメラの外部パラメータの推定を行い、ロボットが移動している環境の特性を認識する方法を開発する。ロボットの輪郭の検出・追跡には色弁別度を用いる。外部パラメータの推定には輪郭の凸特性に基づく外部パラメータの推定方法を用いる。障害物の認識には、ロボットの挙動に着目した衝突判定方法を用いる。輪郭から得られる情報を用いて、衝突や遮蔽の情報を取り入れた地図が作成できる。

キーワード：ロボット，ホモグラフィ，環境地図，障害物認識

Environmental recognition using Create (version 2016/04/13)

MORIMOTO YOSHIKI^{†1,a)} WU HAIYUAN^{†1,b)} SUZUKI KAZUMASA^{†1,c)}

1. はじめに

近年、ロボットの利用分野は拡大しており、掃除や介護、ビジネス補助など様々な人間の生活環境内で利用されている [1]。特に最近では掃除ロボットに視覚センサを搭載し、視覚情報によるロボットの制御の開発が行われている [2]。ロボットを環境内で制御するためには環境内の障害物の位置等の幾何学的情報を記載した環境地図が必要である。環境内に存在する障害物には、ロボットとの衝突の際移動してしまう軽い物体と移動しない重い物体が存在するため、環境地図には幾何学的情報だけでなく重さ等の物理的な情報が含まれるのが望ましい。そうした地図を作成するためには、環境内カメラが撮影した動画像から対象領域を検出・追跡し、実世界と画像との幾何学的関係を求め、環境及びロボットの挙動を認識する必要がある。そこで本研究では、掃除ロボットの挙動を環境内に設置しているカ

メラで観察し、ロボットの身体形状よりカメラの外部パラメータの推定を行い、ロボットが移動している環境の物理的な特性を認識する方法を開発することを目指す。

2. 対象検出・射影変換

本研究ではロボットの輪郭をより堅牢かつ高速に検出・追跡するため、飯塚 [3] らの色弁別度を用いる。しかし、実世界に存在するロボットを画像上で検出する際、その輪郭はノイズが多く、微分等で得られる局所的な特徴は堅牢でない。そこで本研究では輪郭の局所的な部分 (ローカル) ではなく輪郭全体 (グローバル) から得られる特徴を用いることでロボットの挙動を追従し、環境内の障害物を認識する。本章では色弁別度を用いた輪郭検出の方法と、A.Ruiz [4] らの輪郭に基づく幾何学的特徴 (凸特性) を用いた射影変換 (Homography 推定) の方法について述べる。

2.1 色弁別度

色弁別度 [3] とは、対象 (橙点)・非対象 (灰点) のプロトタイプ集合と入力 (赤点) の画素値との距離をそれぞれ求め、これら 2 つの距離から、対象である度合いを表す量で

^{†1} 現在、和歌山大学
Presently with Wakayama University
a) morimoto.yoshiki@g.wakayama-u.jp
b) wuhy@center.wakayama-u.ac.jp
c) suzuki.kazumasa@g.wakayama-u.jp

ある (図 1) . 対象物体の色のプロトタイプと非対象である背景色のプロトタイプを事前に与え, 弁別度 d は次式で与えられる .

$$d = \frac{D_{non-target}}{D_{target} + D_{non-target}} \quad (1)$$

ここで D_{target} は色空間内で入力画素から最も近いターゲットプロトタイプまでの距離を表し, $D_{non-target}$ は入力画素から最も近い非ターゲットプロトタイプまでの距離を表す. 分子に非対象色との距離が入る理由は, 距離は類似度ではなく相違度を表すためである .

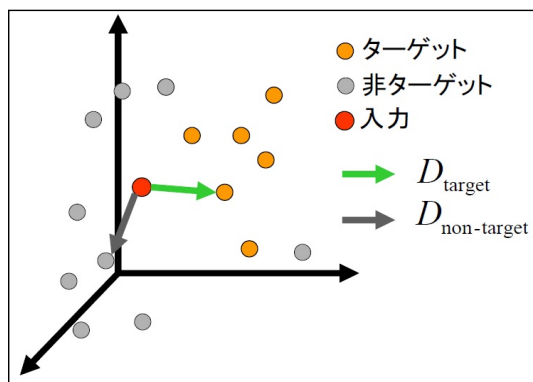


図 1 弁別度算出 [3]

また, 弁別度は以下の性質を持つ .

- 範囲が $[0, 1]$ の値である .
- 0.5 がちょうど最近傍識別での識別境界となる .
- 対象プロトタイプ上で最大値 1 となる .
- 非対象上で最小値 0 になる .
- 任意の非対象プロトタイプから最近傍の対象プロトタイプに至るパス上の色で値が単調に増加する .

このため, 入力画像内の各画素の弁別度を調べることで初期指定された対象の検出ができ, しかも弁別度の高い部分を連続する画像間で対応付けることで, 対象の追跡を行うこともできる. このように弁別度は対象検出・追跡の両方に用いることができる共通の画像特徴である .

また, 入力画像に対して全画素の弁別度を求め, 出力画像にしたものを「弁別度マップ」と呼び, 弁別マップを高速に求めるために Look Up Table(LUT) を用いている. 弁別度の LUT を構築するにはまず対象・非対象それぞれのトレーニングプロトタイプサンプル点に対して, 色空間内で距離変換を行いそれぞれの結果を距離テーブルに書き込んでいく. 構築された対象・非対象距離テーブルの各要素はプロトタイプ集合までの距離を表している. つまり対象距離テーブルは D_{target} , 非対象テーブルは $D_{non-target}$ を表していることとなり, この 2 つの距離テーブルをもとに

量子化された色空間すべてに式 (1) を適応することで弁別度が格納された LUT (弁別度テーブル) が構築できる (図 2) . 従ってこの弁別度テーブルを参照するだけで弁別度が算出できることとなり非常に高速に弁別性マップの構築が行えるようになる .

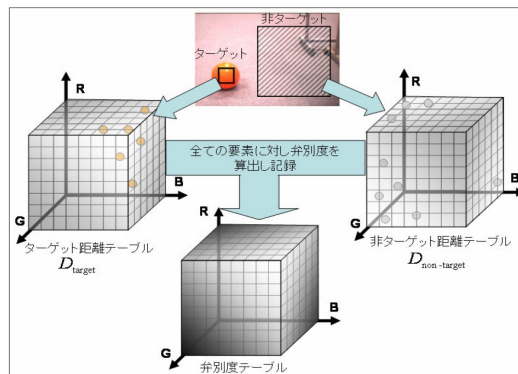


図 2 LUT 構築 [3]

2.2 凸特性を用いた射影変換

輪郭に基づく幾何学的情報 (凸特性) の 1 つとして凸包がある. 凸包とは与えられた点をすべて包含する最小の凸多角形 (凸多面体) のことである. 凸包は形状の全体が画像上にある場合, 射影変換の下で保存されている. 外部の点から曲線に引かれた接線は, 微分によって求められた接線に比べ輪郭点のノイズに対して堅牢である .

ホモグラフィ行列 H の自由度は 8 なので, これを算出するためには最低でも 4 組の対応する特徴点の情報が必要である. しかし, 滑らかな凸形状を覆う 4 本の接線だけでは行列の自由度を埋めることはできない. A. Ruiz[4] は一つ以上の凹部を含む任意形状の平面物体を用いた堅牢な Homography 推定法を提案している. 彼らの手法では, 凹部を用いて接線を増やすことにより残りの自由度を埋める. したがって, 輪郭には少なくとも一つの顕著な凹部が必要である .

図 (3) は単一の凹部に対してホモグラフィを行うためのフレームを構築する方法を表している .

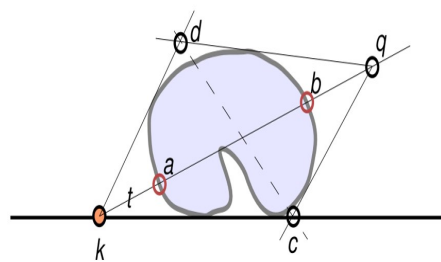


図 3 射影変換フレームの構築 [4]

- (1) 凹部に対する接線 (bitangent) 上に候補点 k を置く .
- (2) 点 k から凹部に対する接線 t を引き、輪郭との交点 a , b を求める .
- (3) 点 k , a , b の 3 点とあらかじめ定めた複比の値を用いて点 q を求める .
- (4) 点 k , q から凸包への接線を求め、それぞれの交点を c , d を求める .
- (5) 対角線 cd が凹部に接するという条件を与えることで候補点 k の場所が一意に定まる .

求められたフレームは全てグローバルな凸特性を用いて生成されたものであり、微分等で得られる局所的な特徴量を用いて構築されたフレームよりも輪郭のノイズに対して頑強であるといえる .

3. 環境内に存在する障害物の認識

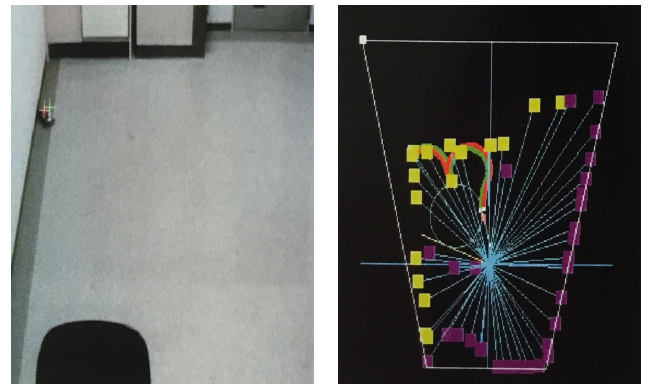
本章ではまず、カメラで撮影した動画内のロボットの挙動から環境内の障害物の認識を行う方法の関連研究について述べ、次に提案する手法について述べる .

3.1 関連研究

関連研究として、上江洲 [5] らのロボットの身体と環境との相互作用に基づく地図作成法がある . この手法では 2 色の LED を取り付けられたロボットに動作命令 (action) を送り、環境カメラで撮影した画像上で追跡し、action とロボットの状態 (state) との相関関係が崩れた場合 (衝突、遮蔽等)、その変化 (behavior) を記録する . 実際の地図作成手順は以下の通りである .

- (1) ロボットを円を描くように走行させ、その軌跡を用いて環境カメラの焦点距離とチルト角を求め外部カメラのパラメータを推定する [6] .
- (2) ロボットは動作命令により画像の中心から様々な方向を探索し、環境カメラによりその挙動を監視しメモリに記録する .
- (3) behavior の変化点を検出し、メモリに記録する .
- (4) 記録された変化点の位置とラベル情報をメモリから読み込み、地図を作成する .

これにより作成された地図は障害物との衝突と遮蔽を考慮した地図となっている (図 4)[5] .



(a) 探索環境 (b) 環境地図
図 4 環境地図 (黄: 衝突, 紫: 遮蔽)[5]

3.2 提案手法

本研究の目的は、ロボットの輪郭から環境内に設置しているカメラの外部パラメータを推定し、ロボットが移動している環境を認識する方法を開発することである . 以下に使用するロボットの概要と障害物の認識を行う手順について記述する .

3.2.1 使用するロボット

本研究ではロボットに iRobot 社が販売している Create[®]*1(以下クリエイト) を使用する . クリエイトは同社が販売しているお掃除ロボットの Roomba[®](以下ルンバ) をベースとした研究・開発用のプラットフォームであり、プログラミングを行うことでルンバ同様自律走行が可能となっていることから様々な研究で使用されている [7][8] .

クリエイトにはあらかじめ、衝突時のバンパーセンサの値によって方向を変え、壁沿いに走行させるプログラムや 8 の字走行をするプログラムがデモプログラムとして実装されている .

3.2.2 障害物認識

クリエイトに搭載されているバンパーには 1 つの顕著な凹部がある . そこでバンパーに色のついた紙を貼り付け、2 章で述べた手法を用いて環境に設置するカメラと凹部を含む平面間の外部パラメータを推定し、Homography 行列を求める . また、環境カメラで撮影された動画よりクリエイトの挙動を追跡し、挙動の変化から環境内の障害物の認識を行う . クリエイトの挙動にはあらかじめ実装されているデモプログラミングを使用する . 凹部に注目すると、凹部の始点及び終点は射影フレームを求める過程で副次的に求められる . そこで本研究ではその 2 点を通る直線の変化を用いて、障害物を検知する (図 5) .

*1 現在は後継機の Create[®]2 が販売されている .



図 5 衝突による傾きの変化

クリエイトが障害物と衝突すると凹部の始点と終点の 2 点を結ぶ直線の傾きは急激に変化する特性がある。この特性を利用し、急激に変化した点を記録し、フレーム間で差分をとることで衝突した障害物が軽い障害物なのか重い障害物なのかが判断できると考える。しかし、予備実験によると、クリエイトのデモプログラムをそのまま利用すると、クリエイトは障害物のない環境でも環境を直進または回りながら進むことが分かったので、傾きの変化速度、角速度を計測するだけでは正確な障害物の認識はできない場合がある。そこで本研究では、障害物との衝突の際に反動で少し下がるという挙動に注目して衝突判定を行う。実際にはフレーム毎に始点と終点を結ぶ線分の中点 $P_t(x_t, y_t)$ を記録し、フレーム間の点の移動量をベクトル \vec{V}_t とし、

$$\vec{V}_t = P_t - P_{t-1} \quad (2)$$

前フレームとのベクトルの積 C_t を求める。

$$C_t = \vec{V}_t \cdot \vec{V}_{t-1} \quad (3)$$

C_t の正負が急激に反転した位置を記録することにより、環境内の障害物を認識する (図 6)。



図 6 ベクトル監視

実際の障害物認識の手順は以下の通りである。

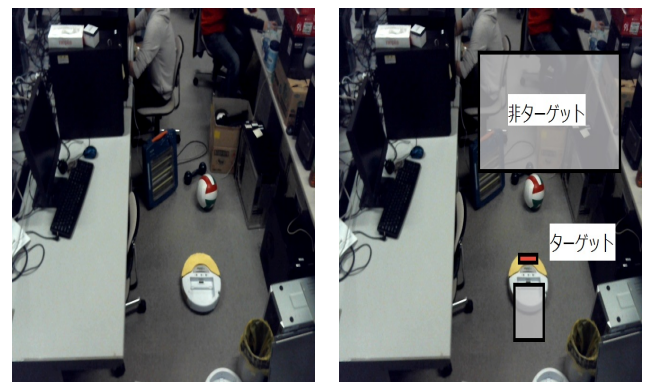
- (1) 色弁別度を用いてクリエイトの輪郭を検出する。
- (2) クリエイトの外形「凹部のある凸部分」(Convex portion with a concave, 以下 CPWC とも呼ぶ) を用いて、環境に設置するカメラと凹部を含む平面間の外部パラメータを推定し、Homography 行列を求める。
- (3) クリエイトが周囲の環境を探索し、凹部のある凸部分 (CPWC) の挙動を追跡する (追跡できない場合は見え隠れのある所として記録可能)。
- (4) 式 3 から、内積の値の正負が変わった位置を検出し、障害物との衝突として地図上に記載する。

4. 実験

前章で述べた提案手法を実装し、実環境で実験を行った。

4.1 CPWC の輪郭検出

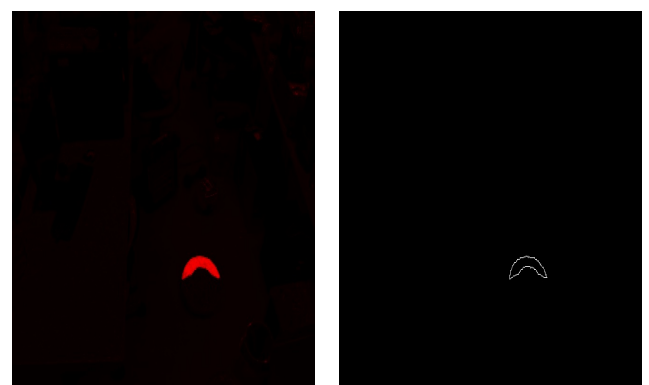
まず、学習用の入力画像から弁別度テーブルを構築する。入力画像として図 7(a) を用いて図 7(b) に示される範囲を対象 (CPWC)・非対象色 (背景) として教示した。この教示データを基に構築した弁別度テーブルにより、弁別性マップを作成した結果とマップから得られる情報を基に CPWC の輪郭を検出した結果を図 8 に示す。



(a) 入力画像

(b) 教示範囲

図 7 弁別度テーブル構築



(a) 弁別性マップ

(b) CPWC の輪郭検出

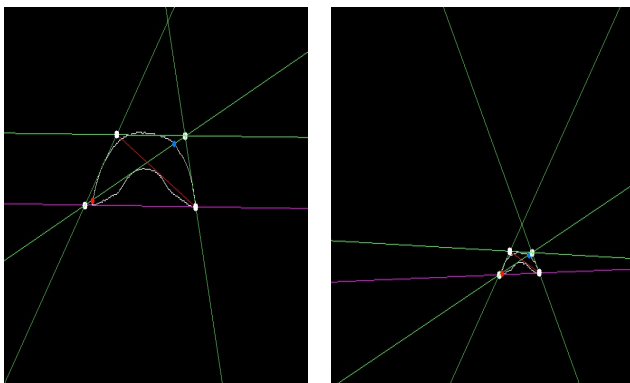
図 8 弁別性マップと CPWC の輪郭検出

4.2 Homography 推定

次に、地図を作成するため、変換先となる俯瞰画像を生成する。入力画像として真上からクリエイトを撮影した画像(図9(a))と、環境内を撮影しているカメラ画像(図9(b))を用いる。それぞれの画像で凸特性に基づいたフレーム構築を行った結果を図10に示す。

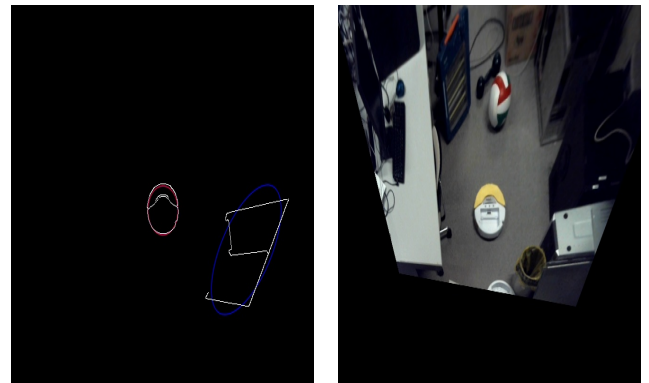


(a) 真上画像 (b) 環境内カメラ画像
 図9 入力画像



(a) 真上画像 (b) 環境内カメラ画像
 図10 フレーム構築

構築されたフレームの各4点から Homography 行列を算出する。算出された Homography 行列で図9(b)の画像を変換し、変換された画像内のクリエイトに対して楕円フィッティングを行った結果を図11(a)に示す。クリエイトの外形は円なので、カメラの外部パラメータが正しく推定された場合、変換後の俯瞰画像上の楕円のパラメータの長軸と短軸は同じはずであるが、ノイズと推定誤差、処理速度を考慮し、長軸と短軸の誤差が長軸の長さの1割以下になるまでフレーム構築を繰り返し、Homography 行列を算出する。算出された行列を用いて変換された画像を俯瞰画像とし、図11(b)に示す。



(a) 楕円フィッティング例 (b) 俯瞰画像
 図11 楕円フィッティング

4.3 CPWC の輪郭追跡

次に、生成した俯瞰画像上でクリエイトを追跡している様子を示す。実験では2つの対象を追跡する。1つはCPWCの輪郭で、輪郭の軌跡を逐次画像上に更新し、地図を作成する。図13、図14の白い領域が輪郭の軌跡を表しており、環境の形状(クリエイトが行動可能な範囲)を表現できていることがわかる。

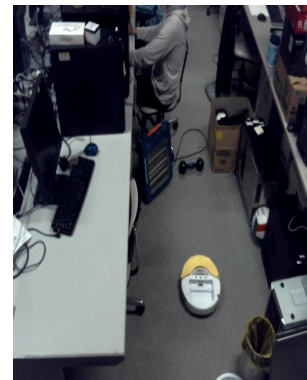
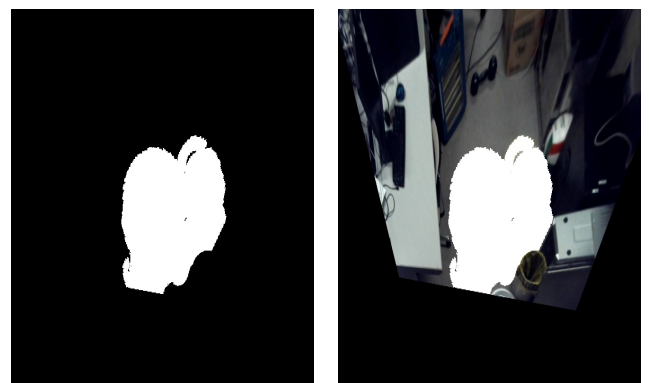
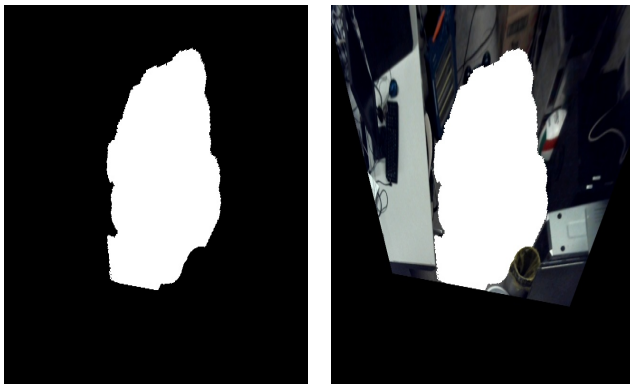


図12 元画像

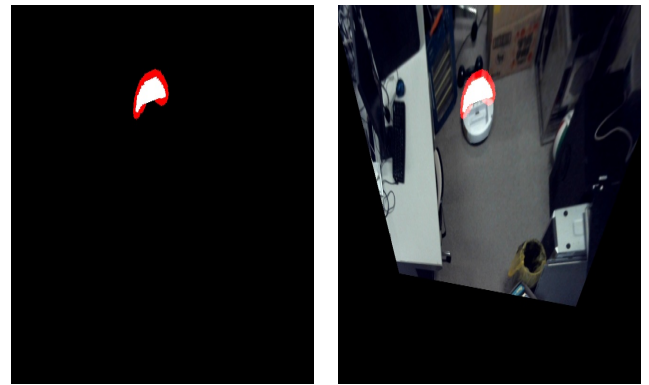


(a) 地図 (b) 地図+入力画像
 図13 地図画像(探索中)



(a) 地図 (b) 地図+入力画像

図 14 地図画像



(a) 地図 (b) 地図+入力画像

図 16 障害物認識

もう一つの対象は凹部の始点と終点を結んだ線分上の中点 P である。
点 P は次で述べる障害物認識に用いられる。

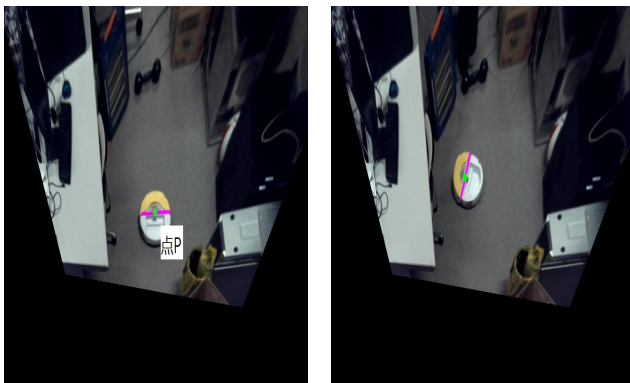


図 15 線分上の点の追跡

4.4 障害物認識

点 P をフレーム毎に追跡し、その移動量と方向をベクトルとし、前フレームのベクトルとの内積の結果により、障害物があると認識された場合、その時点での輪郭を地図上に記載していくことで、障害物の情報を含んだ地図を作成することができる。障害物があったと判定された例を図 16 に示す。図のように、障害物があると認識されたフレームでの輪郭を地図上に赤色で表示している。

実際には線分上の点は、ノイズの影響によりフレームごとに僅かに移動しており、障害物が存在しない場所でも誤って認識してしまうことがあるが、ロボットは環境を縦横様々な方向に走行しているため、誤認した場所でも再び走行することで誤りを訂正できる。実際に修正している様子を図 17 に示す。図 17(a) では、誤認識により障害物がないところに赤色の領域が表示されているが、そのあと再びロボットが通過した時にその領域を更新することにより、図 17(b) では正しく修正されていることがわかる。

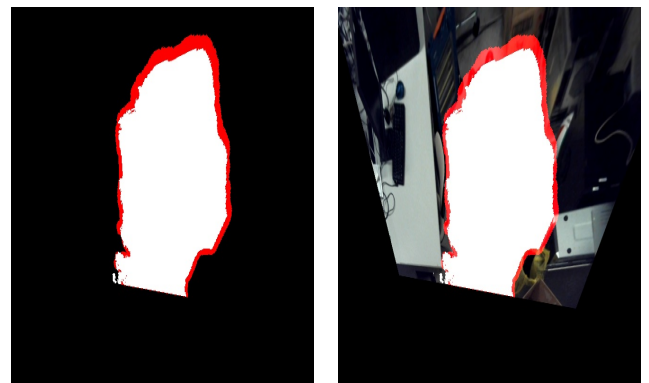


(a) 障害物の誤認 (b) 軌跡による修正

図 17 誤認修正

4.5 実験結果

実際に上記の手順で地図を作成した結果を図 18 に示す。フレームの下端以下は画像領域外を表す。Homography 推定の際、楕円フィッティングの結果によって Homography 行列が変わってしまうため、今回の実験では結果を統一する為に、環境カメラを動かさない限り、一度求めた Homography 行列を固定して実験を行った。図 18 に作成された地図を示す。ロボットの行動可能な範囲を囲むように障害物認識が正しく行えていることがわかる。

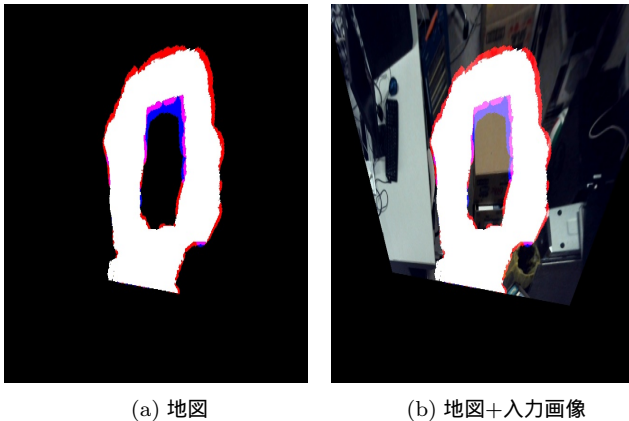


(a) 地図 (b) 地図+入力画像

図 18 実験結果 1

次に、環境内に高さのある障害物を配置し、ロボットの

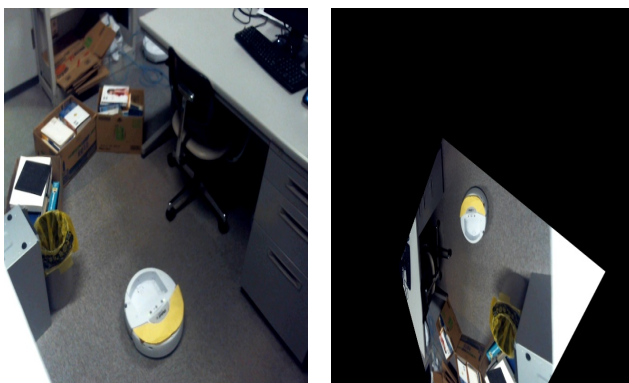
一部が見えなくなる場合の実験を行った．障害物により CPWC が観測されなかった場合のフラグを作成し，次に CPWC が観測された時の凹部に対する接線を，障害物による遮蔽 (青色) として描画した結果を図 19 に示す．図 19 より，CPWC が観測されなかった場合のフラグを用いることによって，障害物による遮蔽を認識できている事がわかる．



(a) 地図 (b) 地図+入力画像

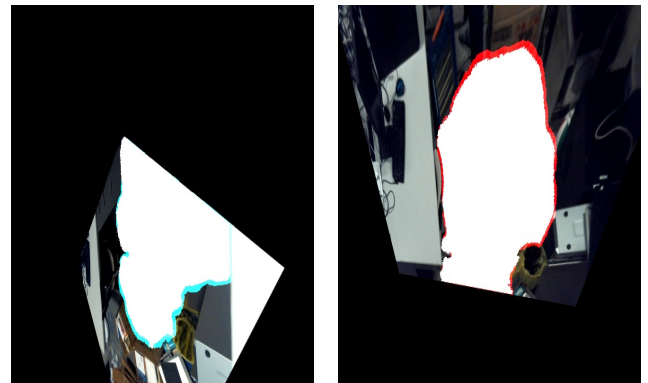
図 19 実験結果 3 (赤色の部分は衝突したところ，青色の部分は CPWC が追跡できない (遮蔽) ところ)

最後に，探索範囲を広げるためにカメラをもう 1 台設置し，2 枚の画像内で同時に輪郭の追跡を行い，地図を作成した．もう 1 台のカメラの入力画像を図 20 に示す．2 つの俯瞰画像に対してモザイク処理を行い，作成された画像に対して輪郭の軌跡と認識情報を記入した結果を図 21 に示す．このように，環境内に配置するカメラを増やすことで，一方のカメラでは見えない領域をカバーすることができ，広範囲な環境地図を作成することが可能となる．



(a) 入力画像 (b) Homography 変換

図 20 カメラ画像 2



(a) 地図 A (b) 地図 B



(a) モザイク画像 (b) 地図 A+B

図 21 実験結果 4

5. 結論

5.1 まとめ・考察

環境内に設置したカメラから得られる動画像を用いて，色弁別度を用いた CPWC の輪郭の検出・追跡と凸特性を用いた射影変換から，環境認識のための地図を作成した．色弁別度を用いて適切な弁別性マップを構築することで，机の下や障害物の影等の明暗がはげしい場所においても CPWC の輪郭の検出・追跡が可能であり，CPWC の輪郭から得られる凸特性を用いることで安定した外部パラメータの推定が行えた．実験結果から，作成された地図は，CPWC の輪郭から得られる情報を用いることで衝突や，遮蔽等の物理的情報を取り入れたり，また複数のカメラを使用することで探索範囲を広げることが可能であることがわかる．しかし，追跡対象に近い色のオブジェクトが近くに存在する場合や，遮蔽物によって凹部が寸断された場合など，画像内から顕著な凹部が検出できない場合は，Homography 行列の推定や衝突，遮蔽といった障害物の正確な認識が困難になる．また，推定された Homography 行列の評価に用いる楕円フィッティングの結果によっては，生成される俯瞰画像の差が激しい等課題が残る．

5.2 今後の予定

上で述べた課題に対して改善策を探る．例として，衝突認識の際に，クリエイトに搭載されているバンパーセンサの値を用いることで，より正確な衝突認識が可能になると考えられる．また，衝突の際にフラグを設けることで前後のフレーム間差分を用いて，衝突した障害物が移動したかどうかを判断することができ，暫定的に障害物が重いオブジェクトなのか，軽いオブジェクトなのかを求めることができる．

現状求められた Homography 行列では凹部が存在する平面しか特定できないため，壁や障害物の高さ等，凹部が存在する平面以外の情報を得ることができない．そこで，クリエイトの上にカメラを搭載し，環境カメラから得られる情報とリンクさせることで，より正確な環境や障害物の認識を行う．最終的には作成された地図と障害物の情報を利用してクリエイトを誘導することで，環境内を効率的に掃除できるようなシステムの開発を目指す．

謝辞

本研究活動において，日ごろからの確かな助言とご指導を頂いた呉海元教授に深く感謝いたします．また，追跡手法の実装や，その他研究にご協力頂いた鈴木一正氏に深く感謝致します．研究室の皆様には日ごろより多くの助言や励ましの言葉を頂きました．心よりお礼を申し上げます．

参考文献

- [1] iRobot. irobot ロボット掃除機ルンバ 公式サイト. <https://www.irobot-jp.com/>, 2015.
- [2] 東海大学 情報理工学部コンピュータ応用工学科. 移動ロボットのビジュアル制御. <https://www.youtube.com/watch?v=Mdn9jrL6hx0>, 2015.
- [3] 飯塚, 和田. 色弁別度を用いた実時間ステレオ対象検出・追跡. 画像の認識理解シンポジウム (MIRU 2006) インタラクティブセッション, pp. 1072–1077, 2006.
- [4] Alberto Ruiz, Pedro E López De Teruel, and Lorenzo Fernández. Robust homography estimation from planar contours based on convexity. In *Computer Vision–ECCV 2006*, pp. 107–120. Springer, 2006.
- [5] 上江洲吉美, 中村恭之, 和田俊和. ロボットの身体と環境との相互作用に基づく地図作成法 (卒論セッション). 情報処理学会研究報告. CVIM,[コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 2003, No. 41, pp. 145–152, 2003.
- [6] 呉海元, 和田俊和, 陳謙ほか. ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーション. 情報処理学会 CVIM 論文誌, Vol. 8, , 2003.
- [7] 尾崎宏樹, 渡邊賢, 長尾確. 小型無人移動体を用いた 3 次元地図の自動生成. 情報処理学会研究報告. ICS,[知能と複雑系], Vol. 2012, No. 1, pp. 1–6, 2012.
- [8] 渡辺賢, 井上泰佑, 長尾確ほか. 小型無人移動体による個人用知的移動体のセンシング領域の拡張とその応用. 研究報告知能システム (ICS), Vol. 2011, No. 8, pp. 1–6, 2011.