全方向ステレオシステムを搭載した移動体による 実環境からの動物体検出

非会員 清水 早苗^{*,**} 正員 山本 和彦^{**}
 非会員 王 彩華^{*} 非会員 佐藤 雄隆^{*}
 非会員 棚橋 英樹^{***} 非会員 丹羽 義典^{*}

Detection of Moving Object by Mobile Stereo Omni-directional System (SOS)

Sanae Shimizu^{*,**}, Non-member, Kazuhiko Yamamoto^{**}, Member, Caihua Wang^{*}, Non-member,
 Yutaka Satoh^{*}, Non-member, Hideki Tanahashi^{***}, Non-member, Yoshinori Niwa^{*}, Non-member

Moving object detection with a mobile image sensor is an important task in robotics and computer vision, when considering the practical use of robots in human environments. In this paper, we propose a robust method that detects moving objects in the environment using the omni-directional depth information obtained by a mobile Stereo Omni-directional System (SOS). In order to detect only the moving objects within the depth image that are obtained by a sensor in motion, we first estimate the ego-motion of the sensor, and generate a predicted depth image for the current time from the depth obtained at the previous time by only considering the ego-motion of the sensor. Then the predicted depth image is compared with the actual one obtained at the current time, and the inconsistent regions are detected as moving objects. When the sensor moves, occlusions will occur in the scene and they will cause false detections. However, these false detections can be suppressed by estimating the occlusion regions using the ego-motion parameters of the sensor and the jump edges in the depth image. The effectiveness of the method is shown with the experiment results on a real environment.

キーワード：全方向画像，全方向ステレオ，移動体ビジョン，動物体検出

Keywords: omni-directional image, omni-directional stereo, mobile robot vision, moving-object detection

1. まえがき

人間共存型の移動ロボットを検討する場合，人間の生活空間という複雑で，かつ時間的変化の大きい環境への適応性が重要となる。特に，観測系が移動しつつ，他の動物体を検出するための技術は，任意に歩き回る複数の人物などを回避しながら安全に移動^{(1)～(5)}したり，人物を追跡するなど，人間と協調した動作を可能とするために重要である。

視覚センサは，広範囲の情報をリアルタイムに取得することが可能であり，このような問題を効率よく解くために有効である。

これまでに，観測系が移動しつつ，他の動物体を検出するための方法として，様々な手法が提案されている。これらの手法は，画像から得られるオプティカルフローを用いる手法と距離情報を用いる手法に大別することができる。

オプティカルフローに基づく手法^{(6)～(10)}は，静止物体領域のオプティカルフローが，消失点を中心として放射状に分布する性質を利用して，その性質を満足しない領域を動物体として検出したり，フローベクトルのクラスタリングによって対象を区別するなどの方法が採られている。これらの提案により，多くの問題が解決された。しかしながら，原理的に対象が観測系の光軸に平行な運動した場合，フローベクトルが十分に検出されず，しかも消失点の位置の差が小さい場合には背景と動物体とを区別することが困難であるといった問題がある。

距離画像を用いた手法^{(11)～(13)}として，物体の動き推定⁽¹¹⁾

* (財) ソフトピアジャパン HOIP/JST
 〒 503-8569 岐阜県大垣市加賀野 4 丁目 1 番地の 7
 HOIP., Softopia Japan and JST,
 4-1-7 Kagano, Ogaki-shi, Gifu 503-8569

** 岐阜大学工学研究科
 〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1
 Faculty of Engineering, Gifu University,
 1-1 Yanai, Gifu-shi, Gifu 501-1193

*** 岐阜県生産情報技術研究所
 〒 509-0108 岐阜県各務原市須衛町 4 丁目 1 7 9 番地の 1 9
 IMIT-Gifu.,
 4-179-19 Sue-cho, Kagamigahara-shi, Gifu 509-0108

を目的とした手法が多く提案されている。広範囲の距離情報を用いた手法として、広範囲をスキャン可能なレーザーレンジファインダを用いた手法⁽¹²⁾では、平面上のレーザー走査により得られる正確な距離情報から動物体を検出しているが、水平 1 ラインの情報しか得られないため、一定の高さにある動物体しか検出できない。また、レーザを回転し走査するため、完全に同時刻の情報を取得できない。全方位カメラを搭載した複数のロボットを用いた手法⁽¹³⁾では、背景差分により得られる動物体領域に対し、ロボット間のステレオ情報によりその 3 次元位置を検出しているが、動物体領域の検出に背景差分を用いているため、検出時にはロボットが静止する必要がある、時間的変化の大きい環境では適応が難しい。

我々は、これまでに全方向ステレオシステム (Stereo Omni-directional System : 以下 SOS)⁽¹⁷⁾ を提案してきた。3 眼ステレオユニットを基本とするマルチカメラシステムである SOS は、センサを中心とした全方向の高解像度のカラー画像と隠蔽の少ない密な距離画像がリアルタイムに得られる。こうした性質を利用して、観測系の任意の平行移動 (垂直軸まわりの回転も含む) と、検出対象となる動物体の任意の並進に対してロバストに動物体を検出するための手法を提案する。そこで本手法ではまず、全方向距離情報とカメラの自己運動パラメータから、観測系の前時刻の全方向距離情報から現時刻の全方向距離情報を予測する。そして予測された全方向距離情報と実際に観測された全方向距離情報を比較することにより、動物体を検出することを特徴とする。なお、一般の視野の限定されたカメラシステムにおいては、前時刻の視野と現時刻の視野のオーバーラップする範囲が十分でない場合があるが、SOS のように全方位の視野をもつセンサーではオーバーラップ領域が十分に得られ、比較が可能である。検出結果には観測系の移動によって起こるオクルージョン領域が含まれるが、これをあらかじめ予測することで検出結果から除去する。本手法では、個別の特徴点や線分などを用いる手法と比較して、領域全体を検出対象とすることにより、ノイズ等に対して安定に対象を検出する。

本論文の構成は次のようである。2. では、全方向ステレオシステム (SOS) の概要について述べる。3. では、本手法を構成する、自己位置・姿勢推定と予測距離画像の算出、およびオクルージョン領域の推定と差分領域の抽出法について述べる。4. では、実画像を用いた実験により本手法の有効性を示し、最後に本論文をまとめる。

2. 全方向ステレオシステム (SOS)

全方向ステレオシステム (SOS) は、システムを中心とした死角のない完全に全方向のカラー画像と距離情報をリアルタイムに取得可能なシステムである⁽¹⁷⁾。図 1 に本システムの外観を示す。本システムは、正 20 面体の各面上に 3 眼ステレオユニットを配置した構造により、全方向に対して等しく、高解像度な情報が得られる。カメラを L 字

図 1 全方向ステレオシステム (SOS) の外観

Fig. 1. The SOS prototype.

表 1 システムの仕様

Table 1. SOS specifications.

Image Sensor	1/3" CMOS Color Image Sensor
Effective Resolution	640(H) × 480(V)
Focal Length	2.9mm
Field of View	96.6deg(H) × 71.9deg(V)
Baseline Length	90mm
Diameter	27cm
Weight	4.5kg

型アームにマウントした 3 眼ステレオユニットを用いることにより、エピポーラ線に平行なエッジ特徴に対し距離が計測できない 2 眼ステレオに対して、あらゆる方向のエッジ特徴に対し距離計測可能である。また、2 組のステレオペアに対してエピポーラ拘束が利用できることから、2 眼ステレオと比較し信頼度が高く、隠蔽の少ない密な距離情報を得ることができる。ダウンサイジングを図るために、3 眼ステレオユニットの配置を工夫することで、セルフ・オクルージョンが発生しない限界のサイズにまで小型化されている。表 1 にシステムの仕様を示す。

3. 全方向動き補償型距離差分法

本論文で提案する全方向動き補償型距離差分法は、時刻 $t - \Delta t$ の時点の距離画像に基づいて予測された時刻 t における予測距離画像と、時刻 t において実測された距離画像を比較することで、動物体を検出することを基本とする。以下で、観測系の自己運動パラメータ算出方法、予測距離画像の算出法、オクルージョン領域の推定法、そして差分領域の抽出法についてそれぞれ述べる。

3.1 観測系の自己運動パラメータの算出 時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t までの観測系 (SOS) の自己運動パラメータである移動方向、回転角度、移動距離の算出を行う。まず、これまで我々が提案した全方位画像のエッジヒストグラムを用いた SOS の自己位置・姿勢 (水平回転) 推定手法⁽¹⁸⁾により SOS の移動方向、回転方向を決定し、次に、時刻 $t - \Delta t$ および時刻 t における全方向距離ヒストグラムに基づいて移動距離を求める、という手順で自己運動パラメータを算出する。

3.1.1 自己位置姿勢推定 詳しくは文献⁽¹⁸⁾に譲

図 2 エッジヒストグラムとパノラマ画像の一例
Fig.2. An example of edge histogram and panoramic edge image.

図 3 SOS の移動とエッジヒストグラムのシフト
Fig.3. SOS movement and edge histogram shift.

り，ここではその概要について述べる。まず，SOS の全方向画像から図 2(a) のような全方位エッジ画像を生成し，さらに各エッジ画素を垂直に投影したエッジヒストグラムを生成する (図 2(b))。この全方位エッジヒストグラムは各方位のエッジ特徴を表しているため，SOS の移動や回転運動により，各方位角においてヒストグラムのシフトを引き起こす。回転運動では，すべての方位角において一定にエッジが変化するため，ヒストグラムのシフト量は一定である。一方，平行移動では，移動方向とエッジ方位角に関係したシフト量が生じる。図 3 に示すように，SOS が時刻 $t - \Delta t$ の地点からある方向 ω に向いて動いたとき， $\omega \pm n\pi, n = 0, 1$ の方位角においてはヒストグラムのシフト量が小さく， $\omega \pm \frac{(2n+1)}{2}\pi, n = 0, 1$ の方位角においてはヒストグラムのシフト量が大きくなる。これらのシフト量は $\sin$ 曲線と同じ周期性を持ち，SOS の回転運動は全体的なシフト量に，移動方向は $\sin$ 曲線のゼロ位相に対応する。これにより，時刻 $t - \Delta t$ における全方位エッジヒストグラムと時刻 t における全方位エッジヒストグラムを動的計画法 (DP) を用いてマッチングし，各方位角におけるヒストグラムのシフト量を求め，これらのシフト量から全体のシフト量とその周期のゼロ位相を独立に当てはめることで，センサの移動方向 ω と回転角度 ϕ を効率的に推定する。本稿では，時刻 $t - \Delta t$ における全方位エッジヒストグラムと時刻 t における全方位エッジヒストグラムから，センサの移動方向 ω と回転角度 ϕ を求めた。

3.1.2 自己運動パラメータの算出 上述の手法から SOS の移動方向 ω と回転角度 ϕ が得られる。これらの値から，全方向距離画像を用いて，移動距離 l を求める。図 4(a) は，実験環境の SOS の時刻 $t - \Delta t$ で得られた全方向距離画像を床面に対し正射影し生成した全方向ヒストグラ

図 4 SOS の正確な位置

Fig.4. Exact position of SOS.

図 5 全方向ステレオ距離画像

Fig.5. Omni-directional depth image.

ムであり，壁部分が直線状のピークとして表れていることがわかる。このヒストグラムにおける直線までの距離変化量を用いて移動方向 ω に対する移動距離 l を推定する。まず，この全方向ヒストグラムにおける 2 次元座標点に対して，各点のヒストグラム値を重みとして考慮した Hough 変換を行い，ヒストグラムにおける主な直線を検出する。これらの直線に対する距離変化を見るため，全方向距離ヒストグラムをさらに各直線に垂直な方向 (ドミナント投影方向 $\vec{v}_1, \vec{v}_2$) に投影した距離ヒストグラムを生成する。移動方向 ω に最も近いドミナント投影方向 (図 4 では $\vec{v}_1$) における時刻 $t - \Delta t$ と時刻 t の距離ヒストグラム (それぞれ図 4(b),(c)) をマッチングすることにより SOS の移動距離 l を求める。

3.2 全方向予測距離画像の算出 時刻 $t - \Delta t$ に取得した全方向距離画像と前節で推定した SOS の自己運動パラメータから，時刻 t の時点で得られる全方向距離画像を推定する。SOS の各ステレオユニットにより得られた距離画像を各ユニットの配置パラメータを用いて球面座標系で表現し，統合することにより全方向距離画像を生成する。図 5 に生成した全方向距離画像の例を示す。ここで横軸は方位角 (θ) であり，縦軸は仰角 (γ) である。 $0 < \theta < 2\pi, -\frac{\pi}{3} < \gamma < \frac{\pi}{3}$ の範囲を対象とする。時刻 $t - \Delta t$ の全方向距離画像の方位角 θ ，仰角 γ 方向における距離値 $s_{\theta, \gamma}$ の画素は，3.1 節によって得られた時刻 t までの自己運動パラメータ (SOS の回転 ϕ ，移動方向 ω とその移動距離 l) により，方位角 θ' ，仰角 γ' 方向の距離値 $p_{\theta', \gamma'}$ の点に移動する。 $\theta', \gamma', p_{\theta', \gamma'}$ は SOS の回転 ϕ ，移動方向 ω とその移動距離 l を用いて次のように求めることができる (付録 1. 参照)。

$$d' = \sqrt{s_{\theta, \gamma}^2 + l^2 - 2s_{\theta, \gamma}l \cos(\theta - \omega) \cos \gamma} \dots \dots (1)$$

SOS から対象までの距離により画像における対象領域面積が変化することから、一定の閾値で動物体とノイズと区別することが難しい。そこで、対象の検出すべき最小移動距離 l_m 、対象とする移動物体の大きさ（幅 $w \times$ 高さ h ）、SOS から対象領域までの距離 R_m を用いて、本稿では、検出対象は床上を移動するものとし、面積フィルタの閾値を式 15 のようにした。

$$S_{th} = \frac{2}{res^2} \arctan\left(\frac{l_m}{2R_m}\right) \left(\arctan\left(\frac{h-h_{sos}}{R_m}\right) + \arctan\left(\frac{h_{sos}}{R_m}\right) \right) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 res は方位角と仰角の分解能、 h_{sos} は床から SOS までの高さである。 l_m の範囲は $0 < l_m < w$ である。対象までの距離が大きいき、画像上に現れる領域は小さくなるが、ここでは各領域までの距離 R_m を考慮することで、対象までの距離に関係なく l_m 以上移動する動物体を検出する。なお、 l_m が小さい場合、時刻 $t - \Delta t$ および時刻 t における動物体領域は、大部分が重なるため、動物体領域全体ではなく変化があった部分のみが検出される。固定カメラシステムでよく用いられるフレーム間差分法のようにこの情報を用いた処理も検討できるが、本論文では行っていない。次章以降の実験においては、分解能 res を 2.0、SOS の高さ h_{sos} を 150cm、対象とする動物体を人物（幅（ w ）30cm $\times$ 高さ（ h ）160cm）、検出範囲を 3m まで、対象動物体の最小移動距離 l_m を 30cm とし、動物体（人物）全体の領域が検出されるようにした。

図 7 時刻 $t - \Delta t$ および時刻 t における全方向カラー画像および全方向距離画像
Fig.7. Omni-directional color and depth images for time $t - \Delta t$ and time t .

4. 実 験

本手法の有効性を検証するため、実画像を用い実験を行った。図 7(a),(b) および図 7(c),(d) は、それぞれ SOS から取得した時刻 $t - \Delta t$ および時刻 t における全方向カラー画像および全方向距離画像である。時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t にかけて、SOS および人物のそれぞれが移動していることがわかる。ここで SOS の自己運動パラメータは、3・1 節で述べた方法により $l = 27.69(cm)$ 、 $\omega = 3.26(rad)$ 、 $\phi = 0.10(rad)$ を得た。この相対移動量と、時刻 $t - \Delta t$ における距離情報（図 7(b)）を用いて生成した時刻 t の予測距離画像を図 8(a) に示す。

図 8(b) は、図 8(a) の予測距離画像と時刻 t において実測した距離画像（図 7(d)）との差分をとり、差分値が正の領域を白で、負の領域をグレーで示したものである。ここで、グレーで示す領域は時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t にかけて消

図 8 実験結果

Fig.8. Experiment results.

図 9 時刻 $t - \Delta t$ 、時刻 t での距離画像、予測距離画像の距離値

Fig.9. Depth values of depth images for time $t - \Delta t$ and time t , and the predicted depth image.

図 10 入力画像

Fig. 10. Input images.

図 11 実験条件

Fig. 11. Experiment conditions.

失した物体の領域の候補, 白で示す領域は出現した物体の領域の候補をそれぞれ示す。白で示す領域には, オクルージョン領域も候補として検出されているが, 3.3 節で述べた方法に従ってオクルージョン領域を推定し (8(c)) 除去した後, 面積フィルタによるノイズ除去処理を施し, 候補領域を取り出したものを図 8(d) に示す。観測系が移動しているにもかかわらず, 動物体である人物領域を安定にひとつの領域として検出できている。図 9 に時刻 $t - \Delta t$ (図 7(b)), 時刻 t (図 7(d)), 予測 (図 8(a)) の各距離画像の上端から 120 ピクセル目の水平 1 ラインの距離値をプロットしたグラフを示す。このグラフから, 動物体が存在しない領域では, 予測距離値と実測距離値がよく一致していることがわかる。一方で, 動物体が存在する領域においては大きな差を生じている。このことから, それぞれの領域は十分判別可能であり, 提案したアルゴリズムが良好に機能していることがわかる。

次に複数の人物が存在する環境において実験を行った。図 10 に, SOS によって取得した画像群を示す。図 10(a) 中に存在する 3 人の人物をそれぞれ左から順に, 人物 A, B, C と呼ぶ。図 11 に, SOS およびそれぞれの人物の位置関係

図 12 実験結果

Fig. 12. Experiment results.

と移動状態を示す。人物 A は, SOS の進行方向と同一直線上を SOS に向かって移動する。人物 B は, 併走するように SOS の進行方向と平行に移動する。人物 C は, SOS の後方を SOS の進行方向に対して斜めに進行する。

これまでの手順と同様に, SOS の自己運動パラメータ $l = 13.0(\text{cm})$, $\omega = 0.90(\text{rad})$, $\phi = -0.03(\text{rad})$ を算出し, 図 12 に示す検出結果を得た。図 12(d) を見ると, 検出対象である 3 人の人物領域を安定に検出できている。ここで, 人物 A は SOS の進行方向線上を移動しており, これまでに提案されてきたオプティカルフローに基づく方法においては検出が困難とされていたが, 本手法においては, 他の移動パターンと同じく検出が可能であることがわかる。次に距離情報の精度が検出へ及ぼす影響について考察する。本手法の検出能力は SOS によって得られる距離情報の精度に依存する。距離の誤差としては, 理論的に対象までの奥行き l の 2 乗に比例した奥行き誤差が生じるほかに, SOS ではパッシブステレオを採用しているため, ステレオ対応点探索精度が環境のテクスチャに依存する。このため一概には論じることが出来ないが, 今回実験を行った環境においては, 2m の距離において $\pm 5, 6\text{cm}$ 程度の誤差を観測した。このことから, 例えば人物が壁に沿って移動する場合においても, 通常人間の幅は 20cm 以上あるため検出が可能であることがわかる。一方, 図 10 の人物 A のように SOS の進行方向線上を運動する場合には, 壁ではなく, Δt 時間前の人物位置との比較になるため, 距離の誤差より大きな人物の移動量が必要になる。

5. むすび

全方向ステレオシステム (SOS) を用いて SOS 自身が移

動しながら動物体を検出するための手法を提案した。SOS から得られる隠蔽の少ない密な全方向距離情報と SOS の全方向画像から得られる自己運動パラメータを用いて、時刻 $t - \delta t$ の距離画像から時刻 t の距離画像を予測し、時刻 t の実測距離画像と比較することで環境中の動物体を領域として安定に検出した。また、視点の移動によって生じるオクルージョン領域を距離画像のジャンプエッジに注目し推定することで、検出結果への影響を低減した。今後は、検出された動物体領域から得られる属性、3 次元の移動量 (方向性と移動量) の評価、また、おかれた環境や動物体の位置や動きの情報に基づいた、SOS の適応的な移動制御 (移動方向や速度等) について考えていく。

謝 辞

本研究を進めるにあたり有益なご意見を頂いた、名古屋工業大学電気情報工学科、佐藤淳助教授に深く感謝いたします。

(平成 15 年 7 月 14 日受付、平成 15 年 11 月 10 日再受付)

文 献

- (1) V.L. Lumelsky: "Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automation Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape", *Algorithmica*, Vol.2, pp.403-430 (xxxx)
- (2) Charles W. Warren: "Multiple robot path coordinations using artificial fields", In Proc. the 1990 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp.500-505 (1990)
- (3) T. Tsubouchi, K. Hiraoka, T. Naniwa, and S. Arimoto, "A mobile robot navigation scheme for an environment with multiple moving obstacles", In Proc. the 1992 IEEE/RSJ International Conf. of Intelligent Robots and Systems, pp.1791-1798 (1992)
- (4) S. Ishikawa and S. Asaka: "A Method of Piloting an Autonomous Mobile Robot in Dynamically Changing Environment Including Moving Obstacles", *JRSJ*, Vol.11, No.6, pp.856-867 (1993-6) (in Japanese)
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」, 日本ロボット学誌学術論文, 11, 6, pp.856-867 (1993-6)
- (5) N. Inoue, K. Inoue, and Y. Ookawa: "On-line Motion Planning of an Autonomous Mobile Robot to Avoid Multiple Moving Obstacles Based on the Prediction of Their Future Trajectories", *JRSJ*, Vol.15, No.2, pp.249-260 (1997-2) (in Japanese)
井上 晃・井上健司・大川善邦:「複数移動障害物の行動予測に基づく自律移動ロボットのオンライン回避行動」, 日本ロボット学誌学術論文, 15, 2, pp.249-260 (1997-2)
- (6) J. Frazier and R. Nevatia: "Detecting moving objects from moving platform", Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1627-1633 (1992)
- (7) N. Ohta: "Structure from motion with confidence measure and its application for object detection", *IEICE Trans.*, Vol.76-D-II, No.8, pp.1562-1571 (1993-8) (in Japanese)
太田直哉:「信頼性情報をもったオプティカルフローからの形状復元とその移動物体検出への応用」, 信学論 (D-II), **J76-D-II**, 8, pp.1562-1571 (1993-8)
- (8) M. Watanabe, N. Takeda, and K. Onoguchi: "A Moving Object Recognition Method by the Principal Component Analysis", *IPSJ SIGNotes Computer Vision* No.099 (1995) (in Japanese)
渡辺 睦・武田信之・小野口一則:「主成分分析を用いた移動物体認識法の検討」, 情報処理学会, 研究報告コンピュータビジョン, No.099 (1995)
- (9) A. Nagai, Y. Kuno, and Y. Shirai: "Detection of moving objects in changing background", *IEICE Trans.*, Vol.78-D-II, No.5, pp.1086-1095 (1997-5) (in Japanese)
長井 敦・久野義徳・白井良明:「複雑変動背景下における移動物体の検出」, 信学論 (D-II), **J80-D-II**, 5, pp.1086-1095 (1997-5)
- (10) T. Ebine and N. Hamada: "Detection of Moving Objects Using Observer Motion-based Optical Flow Estimation", *IEICE Trans.*, Vol.78-D-II, No.6, pp.1498-1506 (2000-6) (in Japanese)
海老根 巧・浜田 望:「観測系の運動を考慮したオプティカルフロー推定に基づく運動物体検出」, 信学論 (D-II), **J83-D-II**, 6, pp.1498-1506 (2000-6)
- (11) B. Sabata and J.K. Aggarwal: "Estimation of Motion from a Pair of Range Images: A Review", *CVGIP(54)*, No.3, pp.309-324 (1991-11)
- (12) M. Lindström and J.-O. Eklundh: "Detecting and Tracking Moving Objects from a Mobile Platform using a Laser Scanner", Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, pp.620-627 (2000)
- (13) Z. Zhu, K.D. Rajasekar, E.M. Riseman, and A.R. Hanson: "3D Localization of Multiple Moving People by an Omnidirectional Stereo System of Cooperative Mobile Robots", *UMassCS TR 2000-14* (2000-3)
- (14) J. Maver and R. Bajcsy: "Occlusion as a Guide for Planning the Next View", *IEEE Trans. PAMI*, Vol.15, No.5, pp.417-33 (1993)
- (15) W.R. Mark, L. McMillan, and G. Bishop: "Post-rendering 3D warping", Proc. 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, Providence, RI, pp.7-16 (1997-4)
- (16) K. Hiruma, T. Okimura, and K. Uehira: "View Generation for a Virtual Camera Using the Multiple Depth Maps", *IEICE Trans.*, Vol.78-D-II, No.5, pp.805-811 (2001-5) (in Japanese)
昼間香織・沖村隆幸・上平員丈:「複数の奥行きマップを用いた仮想視点画像の生成」, 信学論 (D-II), **J84-D-II**, 5, pp.805-811 (2001-5)
- (17) K. Yamamoto, H. Tanahashi, S. Kuwashima, and Y. Niwa: "Sensing of Real Environment by Stereo Omnidirectional System(SOS)", *T.IEE Japan*, Vol.121-C, No.5, pp.876-881 (2001-5) (in Japanese)
山本和彦・棚橋英樹・桑島茂純・丹羽義典:「実環境センシングのための全方向ステレオシステム(SOS)」, 電学論 C, **121**, 5, pp.876-881 (2001-5)
- (18) C. Wang, H. Tanahashi, Y. Sato, H. Hirayui, Y. Niwa, and K. Yamamoto: "Location and Pose Estimation for Active Vision Using Panoramic Edge Histograms", *IEICE Trans.*, Vol.78-D-II, No.10, pp.1400-1410 (2003-10) (in Japanese)
王 彩華・棚橋英樹・佐藤雄隆・平湯秀和・丹羽義典・山本和彦:「全方位エッジヒストグラムを用いたセンサの位置・姿勢推定」, 信学論 (D-II), **J86-D-II**, 10, pp.1400-1410 (2003-10)

付 録

1. 予測画像の生成

SOS の回転がなく ω 方向に距離 l だけ移動した場合を考える。全方向距離画像の画素 $P = (\theta, \gamma)$ 、距離値 d の三次元座標は、 $(d \cos \theta \cos \gamma, d \sin \theta \cos \gamma, d \sin \gamma)$ であり、SOS の移動により $(d \cos \theta \cos \gamma - l \cos \omega, d \sin \theta \cos \gamma - l \sin \omega, d \sin \gamma)$ へ移る。同様に移動した画素 $P' = (\theta', \gamma')$ 、距離値 d' の三次元座標は $(d' \cos \theta' \cos \gamma', d' \sin \theta' \cos \gamma', d' \sin \gamma')$ となり、以下の式が成り立つ。

$$\begin{cases} d' \cos \theta' \cos \gamma' = d \cos \theta \cos \gamma - l \cos \omega \\ d' \sin \theta' \cos \gamma' = d \sin \theta \cos \gamma - l \sin \omega \\ d' \sin \gamma' = d \sin \gamma \end{cases} \quad \cdots \text{(付 1)}$$

上式から θ', γ', d' について解くことで、式 (1), (2), (3), (4) が求められる。ここで、画素 P は、SOS の回転運動に対し方位角方向へ回転角度 $-\phi$ 移るのみであるため、 θ' から ϕ を引く。

2. オクルージョン方向の算出

SOS の移動方向 ω により決められる画素 P の移動方向 $\vec{v} = (v_\theta, v_\gamma)$ は、SOS 中心 O を中心とする球面上画素 P

付図1 オクルージョン方向の算出

app. Fig. 1. Calculation of occluded directions.

における接面 S_1 と P, O を通り SOS の移動方向 ω を含む平面 S_2 との交線方向となる。平面 S_1 の法線ベクトル $\vec{n}_1 = (\cos\theta\cos\gamma, \sin\theta\cos\gamma, \sin\gamma)$ と平面 S_2 の法線ベクトル $\vec{n}_2 = (-\sin\omega\sin\gamma, \cos\omega\sin\gamma, -\cos\gamma\sin(\theta - \omega))$ の交線ベクトル $\vec{v}_l$ は以下のように得られる。

$$\vec{v}_l = \begin{pmatrix} (\cos\omega - \sin\theta\sin(\theta - \omega))\cos^2\gamma - \cos\omega \\ (\sin\omega + \cos\theta\sin(\theta - \omega))\cos^2\gamma - \sin\omega \\ \sin\gamma\cos\gamma\cos(\theta - \omega) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (付2)$$

$\vec{v}_l$ は, $\vec{v} = (v_\theta, v_\gamma)$ を用いて $\vec{v}_l = (\cos v_\theta \cos v_\gamma, \sin v_\theta \cos v_\gamma, \sin v_\gamma)$ と表されるため, 上式との関係より式 (5), (6), (7) が求められる。

3. オクルージョン幅の算出

予測画像においてオクルージョン領域は P' と P'_N の間の領域, 幅 W は P' と P'_N のなす角として現れる。 P' と P'_N は, 画素 P と SOS 中心 O を通り, SOS の移動方向 ω を含む平面 S_2 上にある。平面 S_2 に対し, SOS の 3 次元移動方向 $(\cos\omega, \sin\omega, 0)$ を x 軸とした 2 次元座標系で考えると, $P'(\cos\theta'\cos\gamma', \sin\theta'\cos\gamma', \sin\gamma')$ は, $(d\cos(\theta - \omega)\cos\gamma - l, d\sqrt{1 - \cos^2\gamma\cos^2(\theta - \omega)})$ となり, 移動方向 ω とのなす角 $\alpha(\theta, \gamma, d)$ は以下の式で得られる。

$$\alpha(\theta, \gamma, d) = \arccos\left(\frac{d\cos(\theta - \omega)\cos\gamma - l}{\sqrt{d^2 + l^2 - 2dl\cos(\theta - \omega)\cos\gamma}}\right) \quad \dots\dots\dots (付3)$$

P, P_N の方位角, 仰角, 距離値をそれぞれ θ_1, γ_1, d_1 , そして θ_2, γ_2, d_2 とすると P', P'_N の SOS の移動方向 ω とのなす角は $\alpha(\theta_1, \gamma_1, d_1), \alpha(\theta_2, \gamma_2, d_2)$ となり, その差分が幅 W となる。(式 (10))

清水 早 苗 (非会員) 1977 年 11 月 12 日生。2000 年, 名古屋大学情報文化学部自然情報学科卒業。2002 年, 同大学院人間情報学研究科博士前期課程修了。同年岐阜県 (生産情報技術研究所) 入庁。現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室 (HOIP) 専門研究員。岐阜大大学院工学研究科博士後期課程在学。

山本 和 彦 (正員) 1944 年 6 月 20 日生。1971 年, 東京電大大学院修士課程了。同年電子技術総合研究所入所。1979 年 ~ 1980 年, 米国メリーランド大学にて並列分散型画像理解の研究。1986 年 ~ 1994 年, 電子技術総合研究所知能情報部画像研究室室長。現在, 岐阜大学工学部応用情報学科教授。博士 (工学)。人工知能, パターン認識, 特に図形の柔軟な対応付けの研究に従事。

王 彩 華 (非会員) 1963 年 8 月 26 日生。1983 年, 中国人民大学情報工卒業。1986 年, 同大修士課程修了。同大コンピュータセンター助手, 1988 年講師。1996 年静岡大学電子科学研究科博士課程修了。同年科技団特別研究員として電総研で研究に従事。現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室 (HOIP) 主任専門研究員。博士 (工学)。画像マッチング, ステレオ画像処理, 3 次元モデリングの研究に従事。情報処理学会会員。

佐藤 雄 隆 (非会員) 1971 年 5 月 13 日生。1996 年, 東京農工大学工学部卒業。1998 年同大学院博士前期過程了。2001 年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学博士後期過程了。博士 (工学)。現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室 (HOIP) 主任専門研究員。精密工学会, 映像情報メディア学会各会員。

棚橋 英 樹 (非会員) 1963 年 9 月 15 日生。1985 年, 岐阜大学電子工学科卒。同年岐阜県 (工業技術センター) 入庁。1998 年, 岐阜大学工学研究科博士課程了。現在, 岐阜県生産情報技術研究所主任専門研究員。博士 (工学)。コンピュータビジョン, 特に画像からの 3 次元形状再構成とその応用研究に従事。電子情報通信学会, 人工知能学会各会員。

丹羽 義 典 (非会員) 1951 年 10 月 23 日生。1974 年, 名古屋大学工学部卒業。同年岩崎通信機 (株) 入社。1978 年, 岐阜県 (金属試験場) 入庁。現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室長。主に画像認識, CAD/CAM 関連の研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 映像情報メディア学会各会員。