

距離画像とカラー画像を用いた微小運動の直接推定による
三次元地図生成野崎 慎太^{*1}, 増山 岳人^{*2}, 梅田 和昇^{*3}

Three-dimensional mapping by direct estimation of small motion using range and color images

Shinta NOZAKI^{*1}, Gakuto MASUYAMA^{*2} and Kazunori UMEDA^{*3}^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan^{*2,*3} Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

Received 30 June 2015

Abstract

In this paper, a high-speed three-dimensional map generation method using direct estimation of the motion parameters of the sensor is proposed. The method aligns range images between frames after estimating the motion parameters of the sensor using two kinds of information. One is the relationship of the range images and the motion parameters of a small motion. The other is the relationship of the intensity gradient information of the color images and the motion parameters. The method can create three-dimensional maps quickly because the method does not need to obtain the correspondences of features. Both the processing time required for the motion parameter estimation and the accuracy of the map are verified by experiments using a developed fast RGB-D sensor. It is also shown that the method is applicable to the Kinect sensor.

Key words : Self localization, Three-dimensional mapping, Motion estimation, Range image, Color image

1. 緒 言

自律移動ロボットが実世界において効率的に活動を行う上で三次元地図は重要である。例えば、三次元地図を活用することによってロボット自身が活動する環境における相対位置を知ることができる。三次元地図の多くは複数の距離画像中の特徴量間を対応付ける位置合わせにより生成される。特に、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム (Besl and McKay, 1992)(Chen and Medioni, 1992) を用いた研究が数多く行われている (Newcombe et al., 2011)(Rusinkiewicz and Levoy, 2001)。また、カラー画像を利用し、KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) による特徴点追跡を用いた手法 (Kagami et al., 2005) や画像上のエッジ点追跡を用いた手法 (Tomono, 2009) も提案されている。さらに、距離画像とカラー画像を同時に利用した手法も提案されている (Godin et al., 2001)(Paton and Kosecka, 2012)(Dryanovski et al., 2012)。移動ロボットによる三次元地図生成には、距離画像、もしくは距離画像とカラー画像を同時に取得するセンサを用いることが多い。これらのセンサの計測速度は一般に 30~60 fps 程度である。距離画像の位置合わせはフレーム間の変化が大きいほど困難となるため、センサの計測速度が低い場合、センサの移動速度を制限しなければならない。

我々は 200 fps での計測が可能な高速 RGB-D センサを構築 (Uchida et al., 2013) し、このセンサを用いた三次元地図生成手法 (Uchida et al., 2014) を提案している。この地図生成手法では、RGB-D センサにより距離画像とカ

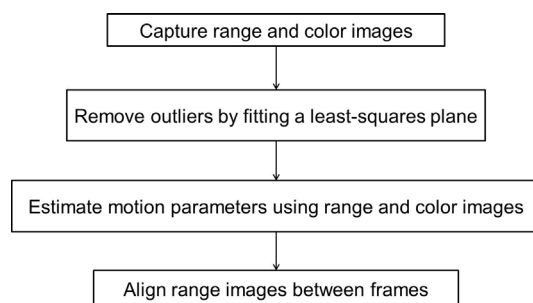


Fig. 1 3D mapping method

ラー画像を高速に取得し、色と三次元の両特徴を同時に用いて時系列データの対応付けを行い、位置合わせを行っている。これにより、センサの移動速度の制限を緩和しつつ、様々な環境の三次元地図生成を可能とした。しかし、対応点探索にかかる計算負荷が大きく、1 フレームの追加に 200～300 ms を要し、オンラインで適用可能な位置合わせ速度を実現することは現実的には困難という問題があった。

そこで、本論文では、直接法と呼ばれる、センサの微小運動に関する運動パラメータと距離画像の関係式を用いて運動を算出する手法 (Umeda and Arai, 1991)(Yamamoto et al., 1993) を用いることで、対応点を探索することなく距離画像の位置合わせを行う手法を提案する (野崎他, 2014)。この手法により、1 フレームの位置合わせにかかる処理時間を 5 ms 以内に短縮しオンラインでの計測が可能になる。この手法は、運動パラメータの成分の推定に、法線方向の異なる複数の平面がシーン中に含まれている必要がある。そこで、さらに、距離画像と同時にカラー画像の輝度勾配情報を用いてセンサの運動パラメータを直接推定することにより、処理時間の増加を最小限にしつつ、複数の平面が含まれていないシーンでも利用可能な手法を提案する (野崎他, 2015)。

本論文の構成は以下の通りである。2 章で本手法の概要を示し、3 章で本研究で用いる高速 RGB-D センサに関して説明する。4 章で直接推定法を用いた運動パラメータの推定に関して詳細に説明し、5 章で本手法の有用性を検証するための実験結果を示す。6 章で本論文の結論を述べる。

2. 三次元地図生成の概要

図 1 に提案手法のフローチャートを示す。まず、高速 RGB-D センサを用いて距離画像及びカラー画像を取得する。次に、最小二乗平面当てはめによる外れ値の除去を行った後、得られた距離画像上の局所平面の傾き及びカラー画像上の輝度勾配情報を基にセンサの運動パラメータに対する拘束式を立て、センサの運動パラメータを推定する。得られたセンサの運動パラメータを用いることで 2 フレーム間の距離画像の位置合わせを行い、三次元地図を生成する。

本論文で距離画像及びカラー画像の取得に用いる RGB-D センサに関しては次の 3 章で、最小二乗平面当てはめによる外れ値除去および運動推定のための運動パラメータの拘束式に関しては 4 章で説明する。

3. RGB-D センサ

本章では我々が構築した RGB-D センサについて説明する。センサの外観を図 2 に示す。本センサは計測点数 361 点の距離画像と VGA サイズのカラー画像を最大 200 fps で同時に取得することができる。距離計測手法にはアクティブステレオ法を用いている。361 点のマルチスポット IR 光を投影するレーザプロジェクタとモノクロ CCD カメラにより距離画像を取得し、カラー CCD カメラによりカラー画像を取得する。コールドミラーを用いることで距離画像とカラー画像を同軸で取得する。コールドミラーは IR 光を透過し、可視光を反射する特性をもつ。そこで、2 つのカメラをミラーに対して鏡像関係になるように配置することで、IR 光はミラーを通過しモノクロカメラで観測され、可視光はミラーで反射しカラーカメラで観測されるため、2 つのカメラが同じシーンを観測することが出来る。距離画像を計測可能な距離は 900 mm～2500 mm、計測可能な範囲は距離 900 mm で $278 \times 278 \text{ mm}^2$ 、距離 2500 mm で $772 \times 772 \text{ mm}^2$ である。屋外計測も可能である。また、距離計測の不確かさ (標準偏差) は、1000 mm で 2 mm、2000 mm で 6 mm である。

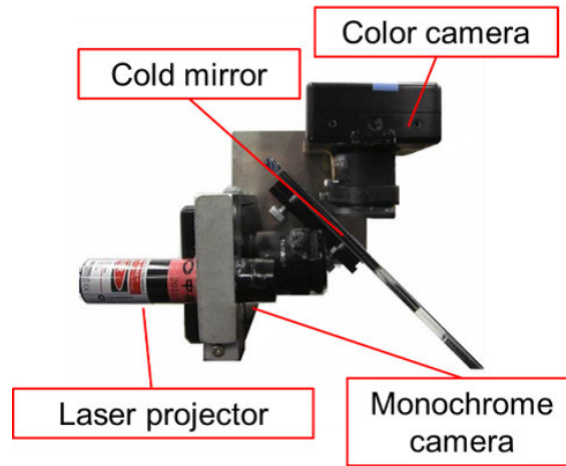


Fig. 2 RGB-D sensor based on the active stereo principle using a multi-spot laser projector

4. センサの運動パラメータ推定

本章では、距離画像及びカラー画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式、ならびに最小二乗平面当てはめによる外れ値の除去方法について説明する。

4.1 距離画像を用いた運動パラメータ推定

図3に示すように、距離画像上のある計測方向を $\mathbf{t}$ 、その計測距離を r とする。このとき、計測方向は既知であり、変化しないものと仮定する。また、計測点の単位法線ベクトルを $\mathbf{n}$ 、距離の変化率を $\dot{r}$ とする。このとき、センサの運動は微小であると仮定すると、フレーム間の計測点の並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0$ 、センサ座標系を原点とした回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ に関して、以下の式が成り立つ (Umeda and Arai, 1991)。

$$\mathbf{n}^T \mathbf{v}_0 + r(\mathbf{t} \times \mathbf{n})^T \boldsymbol{\omega} = \dot{r}(\mathbf{n}^T \mathbf{t}) \quad (1)$$

式(1)は並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ 、回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ の6成分を未知数とする式であり、後述の仮定を満たす各計測点ごとに得られる。これらの式からなる以下の連立方程式を解くことによりセンサの運動パラメータを推定することが出来る。

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{n}_1^T}{\mathbf{n}_1^T \mathbf{t}_1} & \frac{r_1(\mathbf{t}_1 \times \mathbf{n}_1)^T}{\mathbf{n}_1^T \mathbf{t}_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\mathbf{n}_m^T}{\mathbf{n}_m^T \mathbf{t}_m} & \frac{r_m(\mathbf{t}_m \times \mathbf{n}_m)^T}{\mathbf{n}_m^T \mathbf{t}_m} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \dot{r}_1 \\ \vdots \\ \dot{r}_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}$$

運動パラメータの最小2乗解は、擬似逆行列を用いて、以下で与えられる。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^+ \mathbf{y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

得られた運動パラメータを用いることで、距離画像のフレーム間での位置合わせを行うことができる。

4.2 カラー画像を用いた運動パラメータ推定

センサと計測物体との相対的な運動速度ベクトルを $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ 、前フレームの距離画像上の三次元点 $\mathbf{P}_1(X, Y, Z)$ をカラー画像上に投影した点を $\mathbf{p}_1(u_1, v_1)$ とする。三次元点 $\mathbf{P}_1$ の現フレームにおける座標 $\mathbf{P}_2$ は $(X + V_x \Delta t, Y + V_y \Delta t, Z + V_z \Delta t)$ と表すことができる。 $\mathbf{P}_2$ をカラー画像上に投影した点を $\mathbf{p}_2(u_2, v_2)$ とすると、投影点のフレーム間のオプティカルフローは以下のように表すことができる。

$$\dot{u} = u_2 - u_1 = \frac{X + V_x \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_u - \frac{X}{Z} \alpha_u \quad (4)$$

$$\dot{v} = v_2 - v_1 = \frac{Y + V_y \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_v - \frac{Y}{Z} \alpha_v \quad (5)$$

$$\alpha_u = \frac{f}{\delta_u}, \alpha_v = \frac{f}{\delta_v}$$

ただし, f はレンズの焦点距離, δ_u, δ_v は x, y 軸方向の画素間隔である.

センサの運動が微小かつ画像上の輝度の変化が滑らかであると仮定すると, 良く知られているように, ある画素における輝度の時間的変化 I_t は x, y 軸方向の輝度勾配 I_u, I_v より以下のように表すことが出来る (CG-ARTS, 2015).

$$I_u \dot{u} + I_v \dot{v} = -I_t \quad (6)$$

なお, ここでの輝度は, カラー画像の各チャンネルの値でも, あるいはモノクロ画像の輝度でも良い. 本論文の実験では, カラー画像をモノクロ画像化して用いる.

センサと計測物体との相対的な運動速度ベクトル $\mathbf{V}$ は, 運動パラメータ $\mathbf{v}_0, \boldsymbol{\omega}$ を用いて以下のように表すことができる.

$$\mathbf{V} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times (r\mathbf{t}) \quad (7)$$

式 (4), (5), (7) を式 (6) へ代入し整理すると以下の式が導かれる.

$$\begin{aligned} & \alpha_u I_u Z v_{0x} + \alpha_v I_v Z v_{0y} + (-\alpha_u I_u X - \alpha_v I_v Y + I_t Z) v_{0z} + \\ & (-\alpha_u I_u XY - \alpha_v I_v Z^2 - \alpha_v I_v Y^2 + I_t Y Z) \omega_x + (\alpha_u I_u Z^2 + \alpha_u I_u X^2 + \alpha_v I_v XY - I_t X Z) \omega_y + (-\alpha_u I_u YZ + \alpha_v I_v XZ) \omega_z \\ & = -I_t Z^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) は式 (1) と同様に並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0$, 回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を未知数とする式であり, 仮定を満たす各計測点ごとに得られる. 4.1 節と同様に連立方程式を立てて解くことにより, センサの運動パラメータを求めることが出来る.

なお, 理論的には本節の手法のみで運動パラメータの導出が可能であるが, 実験では本節の手法のみで安定に運動パラメータを導出することができなかった. そこで, 実験でカラー画像を運動パラメータ導出に用いる時には, 4.1 節の距離画像を用いた手法と組み合わせて連立方程式を立てている.

4.3 最小二乗平面当てはめによる外れ値除去

4.3.1 距離画像

4.1 節で述べた通り, 距離画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式を立てる際にいくつかの仮定を置いている. これらの仮定を以下にまとめる.

1. フレーム間の運動が微小である
2. 計測方向が既知であり, 変化がない
3. ある計測方向での移動前・移動後の計測点は同一の滑らかな面上に存在する

本研究で用いるセンサは 200 fps での高速な計測を可能としており, かつ距離計測にアクティブステレオ法を採用しているため, 条件 1 及び 2 はすでに満たしている. しかし, 条件 3 は全ての計測点で成り立つことはない. そのため, 計測された点が局所的に滑らかな面上に存在するかを判定し, 異なる点を外れ値として除去する必要がある. 本手法では, 図 4 のように計測点とその周囲の計測点を用いて最小二乗平面を作成し, 平面と各点との誤差の平均値が閾値を超えた場合, その計測点を外れ値として除去する. この時の点数は計 4 点以上であればよく, 本論文ではスポット光が縦横均等に配置されていることから, 周囲の計測点として 8 近傍を対象として計 9 点とする. 図 4(b) のように計測点とその周囲の点が滑らかな同一の面上に存在し, 最小二乗平面との誤差の平均値が閾値を下回る場合のみ, 運動パラメータ推定に使用する. なお, 運動パラメータ推定に用いる法線ベクトルはここで求められた最小二乗平面の法線ベクトルを用いる.

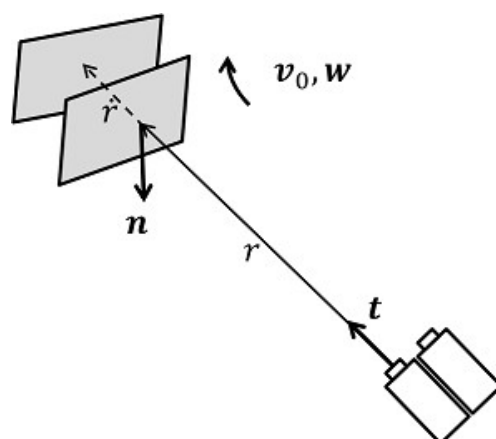


Fig. 3 Parameters of the range-motion equation

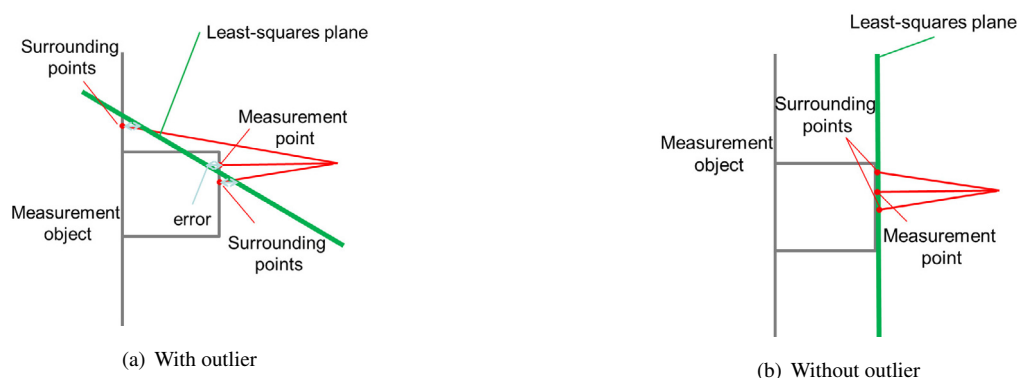


Fig. 4 Fitting a least-squares plane

4.3.2 カラー画像

4.2 節でカラー画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式を立てる際にも、いくつかの仮定を置いている。これらの仮定を以下にまとめる。

1. フレーム間の運動が微小である
2. カラー画像上の輝度の変化が局所的に滑らか

4.3.1 項で述べたように条件 1 はすでに満たしている。しかし、条件 2 は全ての画素で成り立つことはない。そのため、計測点をカラー画像上に投影した点とその周辺の画素の輝度が滑らかに変化しているかを判別する必要がある。そこで、計測点をカラー画像上に投影した点及びその周辺の画素を用いて最小二乗平面当てはめを行い、外れ値を除去する。カラー画像の画素に対して最小二乗平面当てはめを行う際には、画素の座標値及び輝度値の 3 つの値からなる 3 次元ベクトルを用いる。この 3 次元ベクトルを用いて、距離画像と同様に最小二乗平面に当てはめることにより、仮定に当てはまらない点を除去する。なお、以後の実験では、計測点の投影点とその周辺の画素として 11×11 の計 121 点を使用している。

5. 実 験

提案手法の有効性を検証するための実験を行った。まず、提案手法を用いた三次元地図生成を、距離画像のみを利用した場合（4.1 節の手法）、距離画像とカラー画像とを併用した場合（4.1 節と 4.2 節の手法の併用）に関して行った。次に、提案手法によって三次元地図生成を高速に行えることを検証するオンライン実験を行った。さらに、提案手法の汎用性を示すため、Kinect を用いた三次元地図生成実験を行った。

5.1 三次元地図生成

5.1.1 実験環境

提案手法を用いて 2 種類のシーンにおいて三次元地図生成を行った。距離画像の取得は人がセンサを持って移動させながら行い、得られた RGB-D 画像を用いてオフラインで地図生成を行った。本実験では 3 章で述べたセンサを用いて計測を行った。また、カラー画像には 25×25 の平均化フィルタを使用することで画像の平滑化を行った。これにより、エッジ部の輝度変化を滑らかにし、かつノイズの影響を低減することが出来る。計測対象は図 5 に示す平面を十分に含むシーン、及び図 6 に示す平面がほとんどなく小物体のみのシーンとした。計測枚数は図 5 のシーンが 202 枚、図 6 のシーンが 122 枚である。センサの移動距離は、それぞれ 540 mm, 490 mm である。

5.1.2 実験結果

図 5 の対象を計測した結果のうち、距離画像のみを使用した結果を図 7 に、距離画像・カラー画像共に使用した結果を図 8 に示す。このうち、図 7(a), 7(b) は地図の生成過程を、図 7(c) 及び図 8(a) は完成した地図を、図 7(d) 及び図 8(b) は完成した地図にテクスチャマッピングを施した結果を表している。同様に、図 6 の対象を計測した結果のうち、距離画像のみを使用した結果を図 9 に、距離画像・カラー画像共に使用した結果を図 10 に示す。このうち、図 9(a) 及び図 10(a) は完成した地図を、図 9(b) 及び図 10(b) は完成した地図にテクスチャマッピングを施した結果を表している。なお、地図のカラーチャートは、Z 軸方向の距離を表している。

実験結果より、距離画像のみを使用した場合、平面を十分に含むシーンでは、大きな位置合わせ誤差もなく、地図生成が正確に行われていることが分かる。一方、平面がほとんどないシーンでは、位置合わせが正しく行われず、地図生成に失敗している。本手法で、運動パラメータの推定に用いる計測点は、計測点とその周囲の点が同一の滑らかな面に存在する必要があるが、小さな物体や形状が複雑な物体では計測点と周囲の点が同一の面に存在しない。そのため、運動パラメータの推定に有用な計測点が少なく、運動パラメータを推定するための拘束条件が十分に得られなかったことが、位置合わせが正しく行われなかった原因として挙げられる。一方、距離画像とカラー画像を共に使用した場合には、滑らかな面が少ないシーンにおいても大まかな位置合わせに成功している。しかし、図 8(b) の円で囲まれた部分に注目すると、距離画像のみと比較して位置合わせ精度が低下していることが分かる。本センサの露光時間が 5 ms と短くゲインを上げていることからカラー画像のノイズが多いことが、カラー画像を利用した際の地図生成精度の低下の一因と考えられる。また、表 1 より、カラー画像を含めた場合、距離画像のみと比較して 10 倍近く処理時間が増加していることが分かる。これは、最小二乗平面作成において参照する三次元座標が、距離画像で 9 点であるのに対し、カラー画像では 121 点となるため計算量が多いことが原因である。しかしながら、運動パラメータ推定にかかる処理時間は距離画像のみで 1 ms 以内、カラー画像を含めた場合でも 5 ms 以内と短く、オンラインでの地図生成が可能であると考えられる。



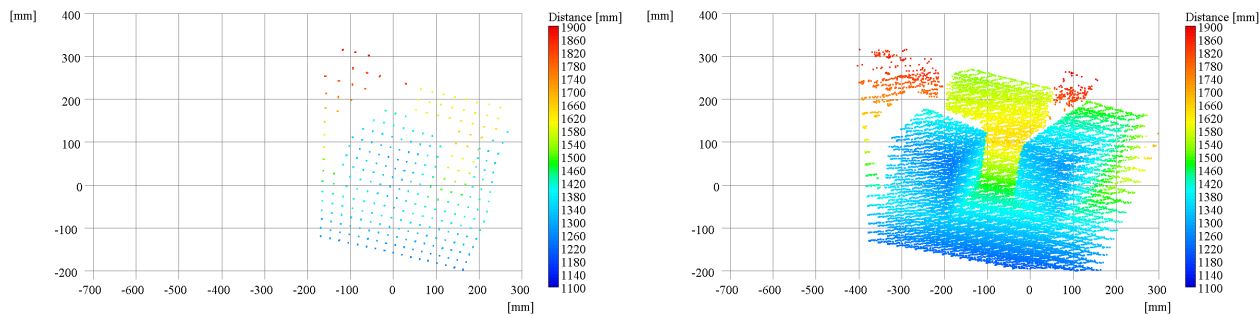
Fig. 5 The measurement scene containing smooth planes



Fig. 6 The measurement scene with only small objects

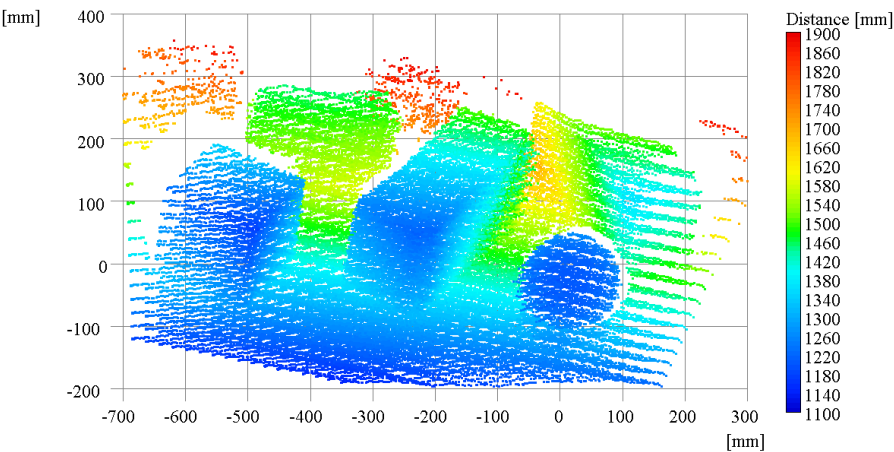
Table 1 Estimation time of the motion parameter (unit:ms)

	Fig.5	Fig.6
Range image	0.56	0.62
Range and color image	4.66	5.00

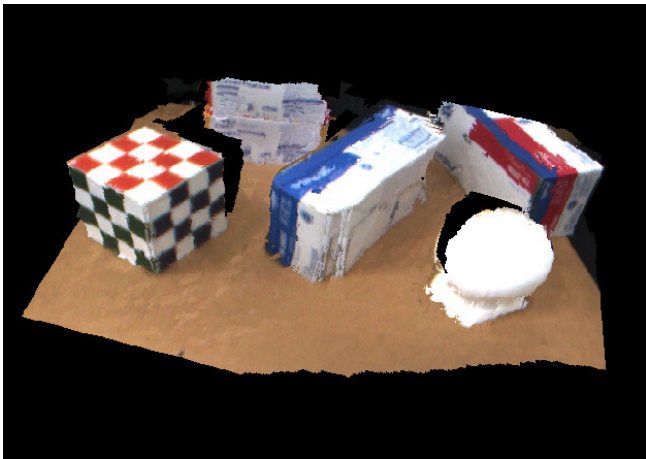


(a) 3D map: 1st frame

(b) 3D map: 102nd frame

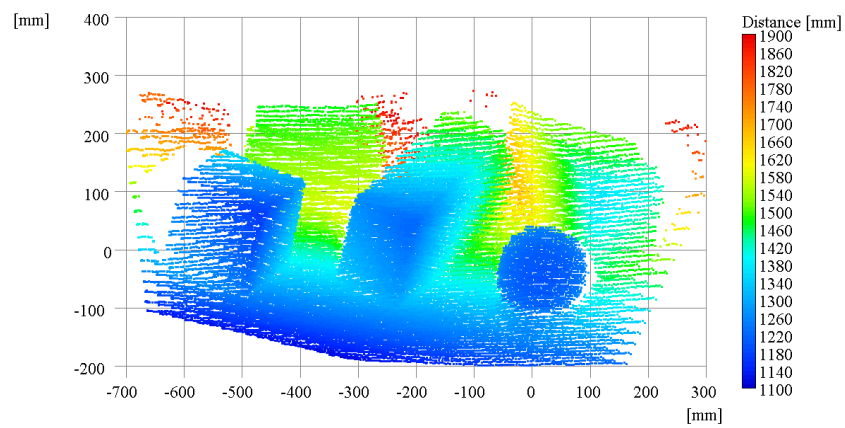


(c) 3D map: 202nd frame



(d) 3D map with texture mapping

Fig. 7 Experimental results to construct 3D map for Fig.5: range image only

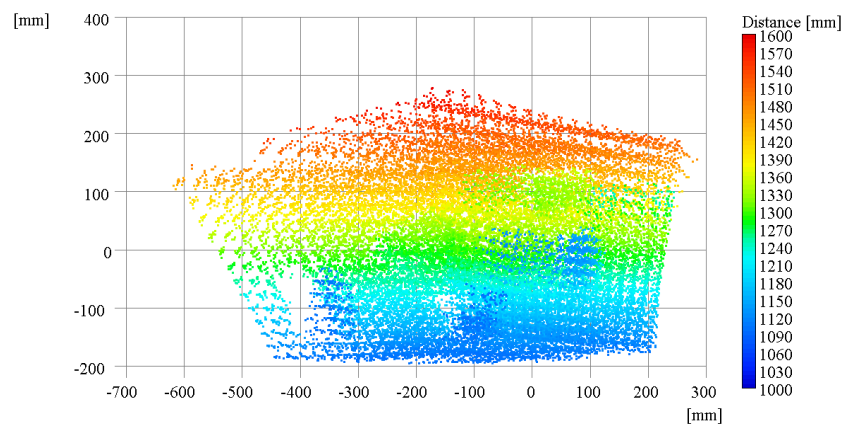


(a) 3D map: 202nd frame



(b) 3D map with texture mapping

Fig. 8 Experimental result to construct 3D map for Fig.5: range and color images

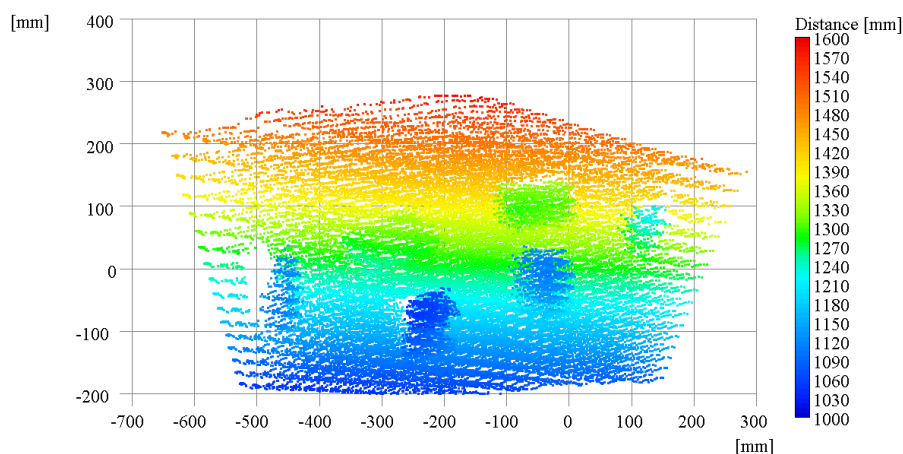


(a) 3D map: 122nd frame



(b) 3D map with texture mapping

Fig. 9 Experimental result to construct 3D map for Fig.6: range image only



(a) 3D map: 122nd frame



(b) 3D map with texture mapping

Fig. 10 Experimental result to construct 3D map for Fig.6: range and color images

5.2 オンライン計測

提案手法によって三次元地図生成を高速に行えることを検証するために、オンライン実験を行った。なお、5.1節の実験で示したように、距離画像単体の方が地図生成の結果が良好かつ高速であるため、ここでの実験は距離画像のみを用いて行った。計測対象は、図 11 に示す、複数の直方体を含むシーンである。

図 12 に実験風景を示す。人がセンサを手で持って横方向に高速に移動させて距離画像を取得しつつ、リアルタイムで三次元地図生成を行った。図 13 は三次元地図生成の様子を、また図 14 は完成した三次元地図を示す。この時、センサの移動量は 900 mm 程度、取得された距離画像は 374 枚、三次元地図生成に要した時間は 5.98 s であった。これより、この時の三次元地図生成を行う処理速度は 62.5 fps となる。本センサは、距離画像・カラー画像の取得のみなら 200 fps で実現可能であり、また三次元地図生成単体でも 5.1 節の実験結果が示すように 200 fps での処理が可能であるが、オンラインでこれらを順次行った場合には、遅くなってしまうことが分かる。なお、プログラムの最適化を行って処理を行った結果、距離画像のみの時で 97.4 fps、カラー画像も用いた時でも 86.8 fps と、本実験の 62.5 fps よりは高速であった。センサのスペックを最大限生かすためには、更なる高速化が必要であると言える。



Fig. 11 The measurement scene with cube-shaped boxes



Fig. 12 The measurement situation

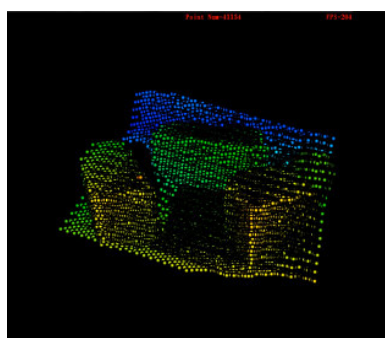


Fig. 13 The mapping process

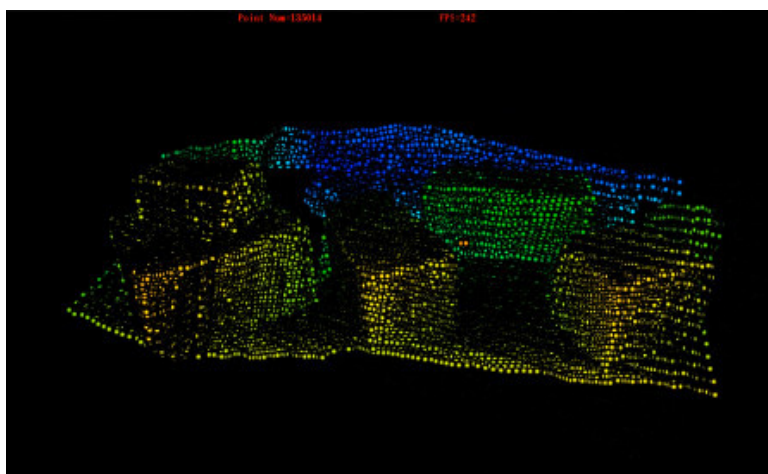


Fig. 14 Constructed 3D map for Fig.11



Fig. 15 The measurement scene of map generation with Kinect v2

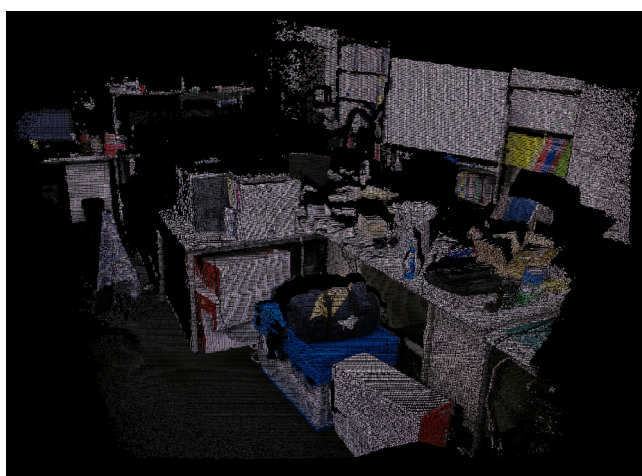


Fig. 16 A range image obtained by Kinect v2

5.3 Kinect for Windows v2 を用いた三次元地図生成

提案手法の汎用性の評価を行うため、一般的な RGB-D センサであり、広い画角と高い解像度を持つ Microsoft 社の Kinect for Windows v2 を用いて提案手法による三次元地図生成を行った。なお、本実験も距離画像のみを用いて行った。

5.3.1 実験環境

実験環境を図 15 に示す。この図で、右のプリンタが載っているテーブルの寸法が、横 900 mm，奥行き 1800 mm，高さ 700 mm である。センサを三脚に設置し、床に対して垂直な軸を回転軸として 90 度ゆっくり回転させることで計測を行った。計測枚数は 152 枚、一枚の計測範囲を図 16 に示す。なお、法線方向推定及び前提条件を満たさない点の除去のための最小二乗平面作成に用いる点として、3 点ごとに 3×3 の 9 点を使用した。

5.3.2 実験結果

地図生成結果を図 17, 18 に示す。Kinect v2 の水平画角は 70 度であるので、90 度回転させることで、図 17, 18 は水平画角が 160 度に拡張したことになる。運動パラメータ推定に要した時間は 345 ms であった。図 17, 18 より、雑多に物が置かれている環境に置いても大きな位置合わせ誤差もなく、正確に広範囲の地図生成が出来ることが分かる。Kinect v2 の距離画像の解像度は 512×424 と構築したセンサと比較して高く、小型の物体や複雑な形状の物体においても正確な法線方向を推定することが可能であったため、正確な地図生成が実現できたと考えられる。また、画角が広いため、回転運動による各計測点の移動方向に大きな違いが現れ、回転運動パラメータの推定が容易となったことも正確な地図生成が実現できた要因の 1 つであると考えられる。一方で、運動パラメータ推定に 300 ms を超える時間がかかっているため、オンラインの地図生成は困難である。これは、解像度が

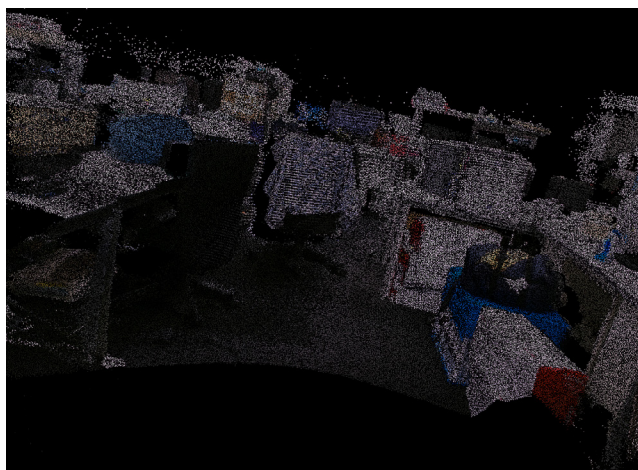
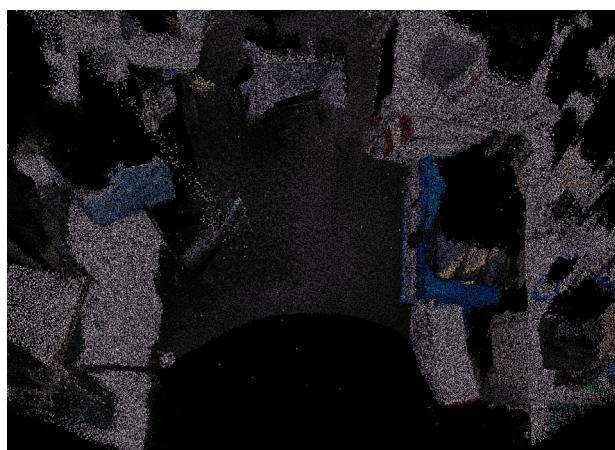
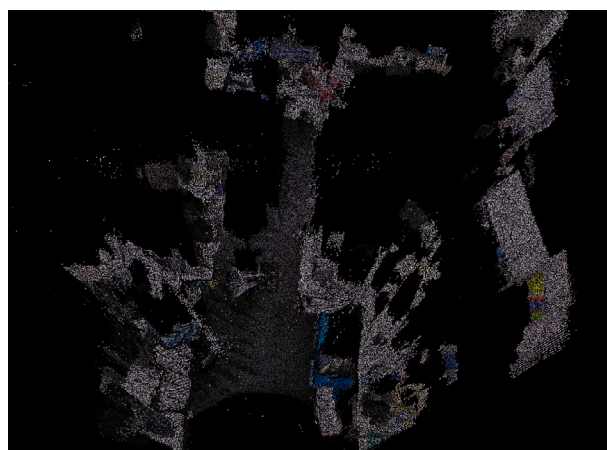


Fig. 17 Experimental result to construct a 3D map using Kinect v2 with only rotational motion for Fig.15



(a) Enlarged view



(b) Overall view

Fig. 18 Experimental result to construct a 3D map using Kinect v2 with only rotational motion for Fig.15 (bird's eye view)

高く、拘束式を立てる処理を 20 万回以上繰り返し行っていることが原因である。しかし、拘束式を立てる処理 1 回に必要な計算コストは小さいため、GPU による並列処理や、あるいは点の適当な間引きにより、処理時間の短縮が図れると考えている。

なお、Kinect を用いた地図生成では、KinectFusion(Newcombe et al., 2011) が良く知られている。KinectFusion は、時系列に得られる複数枚の距離画像を最適化しつつ統合することで、高精細の三次元地図をリアルタイムに構築可能な、優れたシステムである。一方、本論文の手法は、連続する 2 枚の画像から運動パラメータを推定し、得られた運動パラメータを用いて距離画像を変換して重ね合わせているのみで、複数画像を用いた最適化は行っていない。(Newcombe et al., 2011) では、単純に 2 枚の画像を用いるだけでは地図生成はうまくいかないことが報告されており、本論文の手法が 2 枚の画像を用いるだけで地図生成を実現できていることの有効性が示唆される。ただし、上記のように提案手法が現状で KinectFusion より時間を要すること、また(最適化によって)最終的に生成される三次元地図の品質が KinectFusion の方が優れていることから、提案手法の実装には改善の余地があると言える。

6. 結 論

本論文では、距離画像とカラー画像に基づく直接推定法を用いた実環境の三次元地図生成手法を提案した。実験により、平面が複数存在する環境では、距離画像のみで正しくかつ高速に三次元地図生成が行えることを示した。また、平面が少ない環境においても、カラー画像を用いることにより地図生成が可能となることを示した。また、

高速 RGB-D センサを用いて 200 fps での高速な三次元地図生成が可能であることを示した。さらに, Kinect でも利用可能であることを示すことで, 提案手法の汎用性を示した。

今後は, 三次元地図生成の精度向上を目指す。特に, カラー画像を用いる際の誤差の原因を明らかにし, 改善したいと考えている。

謝 辞

実験遂行やデータ整理で尽力してくれた中央大学 木村 優志氏に感謝する。また, 本研究は JSPS 科研費 26330205 の助成を受けたものである。

文 献

- Besl, P. J. and Mckay, N. D., A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2 (1992), pp.239–256.
- CG-ARTS 協会, デジタル画像処理 [改訂新版] (2015), p.291.
- Chen, Y. and Medioni, G., Object modelling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing, Vol.10, No.3 (1992), pp.145–155.
- Dryanovski, I., Jaramillo, C. and Xiao, J., Incremental registration of RGB-D images, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2012), pp.1685–1690.
- Godin, G., Laurendeau, D. and Bergevin, R., A method for the registration of attributed range images, Proceedings of 2001 Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM) (2001), pp.179–186.
- Kagami, S., Takaoka, Y., Kida, Y., Nishiwaki, K. and Kanade, T., Online dense local 3D world reconstruction from stereo image sequences, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2005), pp.3858–3863.
- Newcombe, R. A., Izadi, S., Hilliges, O., Molyneaux, D., Kim, D., Davison, A. J., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S. and Fitzgibbon, A., KinectFusion: real-time dense surface mapping and tracking, Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'11 (2011), pp.127–136.
- 野崎慎太, 増山岳人, 梅田和昇, 距離画像を用いた微小運動の直接推定による高速三次元地図生成, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1J2-03 (2014).
- 野崎慎太, 増山岳人, 梅田和昇, 距離画像とカラー画像を用いた微小運動の直接推定による三次元地図生成, 第 20 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 1B3 (2015).
- Paton, M. and Kosecka, J., Adaptive RGB-D localization, Proceedings of 2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision (CRV) (2012), pp.24–31.
- Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., Efficient variant of the ICP algorithm, Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (2001), pp.145–152.
- Tomono, M., Robust 3D SLAM with a stereo camera based on an edge-point ICP algorithm, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2009), pp.4306–4311.
- Uchida, Y., Nozaki, S., Terabayashi, K. and Umeda, K., Construction of a coaxial textured range image sensing system, Proceedings of 11th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (2013), pp.168–174.
- Uchida, Y., Nozaki, S., Masuyama, G. and Umeda, K., 3D mapping using an RGB-D sensor, Proceedings of 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (2014), pp.27–32.
- Umeda, K. and Arai, T., Measurement of 3D motion parameters from range images, Proceedings IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991), pp.383–388.
- Yamamoto, M., Boulenger, P., Beraldin, J. A. and Rioux, M., Direct estimation of range flow on deformable shape from a video rate range camera, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.1 (1993), pp.82–89.

References

- Besl, P. J. and McKay, N. D., A method for registration of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2 (1992), pp.239–256.
- CG-ARTS, Digital image processing (newly-revised edition), p.291 (in Japanese).
- Chen, Y. and Medioni, G., Object modelling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing, Vol.10, No.3 (1992), pp.145–155.
- Dryanovski, I., Jaramillo, C. and Xiao, J., Incremental registration of RGB-D images, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2012), pp.1685–1690.
- Godin, G., Laurendeau, D. and Bergevin, R., A method for the registration of attributed range images, Proceedings of 2001 Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM) (2001), pp.179–186.
- Kagami, S., Takaoka, Y., Kida, Y., Nishiwaki, K. and Kanade, T., Online dense local 3D world reconstruction from stereo image sequences, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2005), pp.3858–3863.
- Newcombe, R. A., Izadi, S., Hilliges, O., Molyneaux, D., Kim, D., Davison, A. J., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S. and Fitzgibbon, A., KinectFusion: real-time dense surface mapping and tracking, Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'11 (2011), pp.127–136.
- Nozaki, S., Masuyama, G. and Umeda, K., Fast three-dimensional mapping by direct estimation of small motion using range images, Proceeding of the 32nd Annual Conference of the Robotics Society of Japan (2014), 1J2-03 (in Japanese).
- Nozaki, S., Masuyama, G. and Umeda, K., Three-dimensional mapping by direct estimation of small motion using range and color images, Proceeding of the 20th Robotics Symposia (2015), 1B3 (in Japanese).
- Paton, M. and Kosecka, J., Adaptive RGB-D localization, Proceedings of 2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision (CRV) (2012), pp.24–31.
- Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., Efficient variant of the ICP algorithm, Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (2001), pp.145–152.
- Tomono, M., Robust 3D SLAM with a stereo camera based on an edge-point ICP algorithm, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2009), pp.4306–4311.
- Uchida, Y., Nozaki, S., Terabayashi, K. and Umeda, K., Construction of a coaxial textured range image sensing system, Proceedings of 11th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (2013), pp.168–174.
- Uchida, Y., Nozaki, S., Masuyama, G. and Umeda, K., 3D mapping using an RGB-D sensor, Proceedings of 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (2014), pp.27–32.
- Umeda, K. and Arai, T., Measurement of 3D motion parameters from range images, Proceedings IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991), pp.383–388.
- Yamamoto, M., Boulenger, P., Beraldin, J. A. and Rioux, M., Direct estimation of range flow on deformable shape from a video rate range camera, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.1 (1993), pp.82–89.