

エピポーラ拘束を利用した 複数レンジデータのロバストな同時位置合わせ

上原康彦[†], 倉爪亮^{††}, 池内克史^{†††}

[†]東京大学大学院情報理工学系研究科

^{††}九州大学大学院システム情報科学研究所

^{†††}東京大学生産技術研究所

異なる位置から測定された複数枚の距離画像および Reflectance 画像（反射輝度画像）を位置合わせする新たな手法を提案する。ICP 法等これまでに提案されている距離画像の位置合わせ手法の多くは、距離画像間で 3 次元距離がもっとも近い点のペアを選択し、その間の距離の総和が小さくなるように姿勢を決定していた。本研究ではこの位置合わせ手法を拡張し、誤差関数として、従来の 3 次元距離の総和に加えてレーザースキャナから得られる Reflectance 画像上のエピポーラ誤差を用いることによって、局所解に対してよりロバストな位置合わせを実現する手法を提案する。

Robust Simultaneous Alignment of Multiple Range Images Using Epipolar Constraint

Yasuhiko Uehara[†], Ryo Kurazume^{††}, Katsushi Ikeuchi^{†††}

[†]Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

^{††}Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

^{†††}Institute of Industrial Science, University of Tokyo

This paper proposes a new alignment method of multiple range images measured from different positions with laser scanner. In most conventional alignment methods, for instance the famous ICP method proposed by Besl and McKay, the pairs of nearest points in range images are chosen, and the optimum relative pose between range images is calculated, to minimize the sum of 3D distances between point pairs. In this research, a new robust alignment algorithm utilizing laser reflectance images and epipolar constraints is proposed. In this method, the relative pose between two range images is determined using not only 3D distances of point pairs, but also corresponding epipolar lines in reflectance planes.

1 はじめに

実物体の形状をレーザースキャナを用いて計測し、3次元の形状モデルをコンピュータ内に生成することは、さまざまな分野でニーズがあり、近年では重要な研究分野のひとつとなっている。

計測された距離画像のデータから3次元の幾何モデルを生成するにはメッシュ生成、位置合わせ(アラインメント)、統合(マージング)の3段階を経る必要がある。これらの操作を手動で行うには多くの労力が必要であるため、これらの操作を自動化し、計測データから手作業なしで3次元形状モデルを生成する研究が多く行われてきた。

本研究ではこのうち、距離画像の位置合わせ作業での新たな自動化手法を提案することを目的とする。ICP法などの位置合わせ手法の多くは、各距離画像間で3次元距離がもっとも近い点のペアを選択し、その間の距離の総和が小さくなるようにマッチングされることで、距離画像間の位置・姿勢を決定していた。本研究ではこの位置合わせ手法を拡張し、誤差関数として従来の3次元距離の総和に加え、レーザースキャナから得られるReflectance画像(反射輝度画像)上のエッジポラ誤差を用いることによって、局所解に対してよりロバストな位置合わせを実現する手法を提案する。

2 関連研究

計測された複数の距離画像を位置合わせして実物体の3次元形状モデルを生成する方法については、これまでにさまざまな手法が提案されている。これらは、

- A) 戦略 (sequential vs. simultaneous)
- B) 対応付け単位 (point-based vs. feature-based)
- C) 誤差の評価 (point-to-point vs. point-to-plane)

の3種類の問題に分類することができる。

Aは、位置合わせを行う複数の距離画像をどのように扱うかという問題である。sequentialな戦略[1]は、2枚の距離画像間の位置合わせを順次行うことで、全体の位置合わせを行う戦略である。同時に取り扱う単位が2枚の距離画像のみであるため、位置合わせの計算にかかる計算コストが小さいという利点がある。一方で、それぞれの位置合わせのステージで生み出される誤差が蓄積していき、最終的には大きな誤差になってしまうことがある。simultaneousな戦略[9]とは、全ての距離画像を同時に扱い、複数枚の距離画像間の誤差関数の最小化問題を解くことで解決しようとする戦略である。位置合わせする対象となる距離画像をすべてメモリ上に置かなければならないため、計算コストが比較的高くなるが、sequentialで生じる累積誤差が生じないため、全体として正確な位置合わせを行うことができる。

Bは、位置合わせを行うに際して距離画像をどのような形式で扱うかという問題であり、point-basedな手法とfeature-basedな手法がある。前者では距離画像を構成する点の情報を直接使って位置合わせをするのに対し、feature-basedな手法では距離画像に対して何らかの操作を行って得られた特徴点を手がかりに位置合わせを行う。feature-basedな手法は適切な特徴点がうまく得られればpoint-basedな手法に比べて計算コストを小さく抑えることができるが、実際には得られた特徴点にはさまざまなノイズが混入している場合が多く、point-basedな手法を用いた方がよりロバストな位置合わせができる場合が多い。

Cは、point-basedな手法で位置合わせを行う場合、距離画像間の誤差をどのように評価するかという問題である。まず単純に距離画像間の最近傍点の間のユークリッド距離を用いるpoint-to-pointな手法[1]があるが、これは距離画

像内にある面の情報を一切考慮していないため、平面どうしが平行にずれて近接している場合に局所解に陥ってそれ以上の位置合わせが行えなくなってしまう事態が起こりうる。これに対して、一方の距離画像内の点ともう一方の面との間の距離を用いて最小化を行う point-to-plane の手法[2]では局所解に対してよりロバストな位置合わせを行うことができるが、対応する面を計算する必要があるので計算コストが高くなってしまふ。

我々はこれまでに、simultaneous 戦略、point-based な対応付け単位、point-to-point な誤差評価を採用した位置合わせ手法を開発しているが[3]、局所解に陥りやすいという欠点があり、これを回避することが必要とされてきた。

3 提案手法

従来では2枚の距離画像の3次元空間におけるユークリッド距離が誤差関数とされてきた。本研究ではこれに加え、レーザースキャナで得られる Reflectance 画像の誤差も評価することで、よりロバストな位置合わせを行う手法を提案する。

Reflectance 画像とは、レーザースキャナによる計測で距離画像と同時に得られる画像で、3次元物体からのレーザー反射輝度を数値化した2次元画像である。この Reflectance 画像は、対応する距離画像と同じ座標系上に得られるので、Reflectance 画像の情報を距離画像の位置合わせに利用することが可能である。

提案する手法では、複数枚の距離画像の位置合わせを行う前段階として、2枚ずつの距離画像をエピポーラ拘束条件を加えて位置合わせし、その後全ての距離画像に対して[3]の手法で同時位置合わせを行うことで、局所解に対してよりロバストな位置合わせを実現している。

3.1 エピポーラ拘束条件

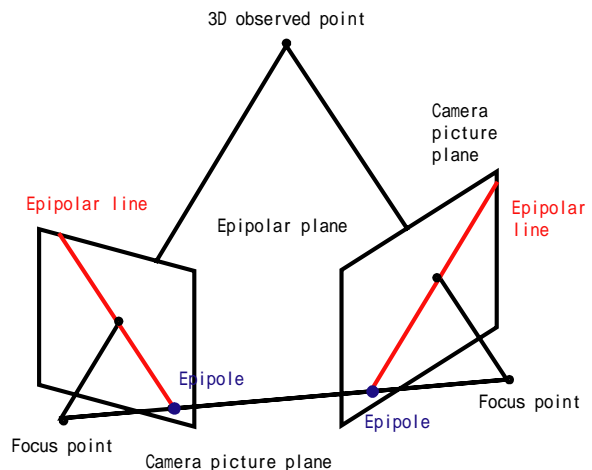


図 1: エピポーラ拘束の概念図

図 1 は、エピポーラ拘束条件の概念を表している。2つのカメラから3次元実物体上の同じ点を観測しているとすると、その点とカメラ視点、それぞれのカメラ座標系における対応点はすべて同一平面上にあるはずである。この平面をエピポーラ平面といい、エピポーラ平面とそれぞれのカメラ画像平面との交線をエピポーラ線という。エピポーラ線は、3次元空間中のどの点を観測していても特定の1点を通り、その点をエピポールという。エピポールは2つのカメラのカメラ視点を結んだ直線とカメラ画像平面との交点である。

2つのカメラの相対姿勢、3次元空間上の観測点、カメラ座標系上の対応点のペアがすべて正しければ、一方のカメラ座標系上の対応点は、もう一方のカメラ座標系上の対応点から計算されたエピポーラ線上にあるはずである。これをエピポーラ拘束条件といい、エピポーラ線と対応点の2次元ユークリッド距離をエピポーラ誤差と呼ぶ。

3.2 同時位置合わせのアルゴリズム

(1)複数枚の距離画像の中から2枚を選んで、エピポーラ拘束条件を用いた位置合わせを行う

これから位置合わせを行おうとしている複数枚の距離画像のうち、隣り合うと思われる2枚の組を選び出して、エピポーラ拘束条件を用いた位置合

わせを行う。現段階では、位置合わせする 2 枚の選び方、位置合わせの回数の決め方は自動化されておらず、手作業によっている。

(2)すべての距離画像を simultaneous に位置合わせする

ロバストな同時位置合わせ手法[3]を用いて、全ての距離画像を同時に位置合わせする。

4 エピポーラ拘束条件を用いた位置合わせアルゴリズムの詳細

4.1 カメラの内部パラメータの推定

それぞれの距離画像におけるカメラの内部パラメータを求める。この内部パラメータは、距離画像から計算可能で、位置合わせを行う前にあらかじめ求めておく。

4.2 特徴点の抽出

位置合わせしようとしている距離画像と同時に得られた2枚の Reflectance 画像に KLT 法[8]を適用して、3次元実物体上の同じ点を表していると思われる特徴点のペアを自動抽出する。

4.3 位置合わせ

位置合わせする 2 枚の距離画像をそれぞれ model 画像, scene 画像とよび、相対姿勢を P で表す。

位置合わせの実現誤差は P の関数であり、 $E(P)$ と書くことにすると、結局 2 枚の距離画像の位置合わせとはこの $E(P)$ を最小にする P を求めることである。

$E(P)$ は従来の手法では 2 枚の距離画像間で求められた対応点どうしのユークリッド距離の関数で表される誤差関数だが、本研究ではこの手法を拡張し、4.2 で求めた特徴点のペアからエピポーラ誤差 $E_{epipolar}(P)$ を求めて位置合わせの実現誤差に (適当な正規化の後に) 算入する。

以上より、提案する手法では最小化するべき誤差関数は、 α, β を適当なゲインとして

$$E(P) = \alpha E_{alignment}(P) + \beta E_{epipolar}(P)$$

で表されることになる。

ここで $E_{alignment}(P)$ は従来の手法における

$E(P)$ と同じものである。本研究では、共役勾配法を用いて $E(P)$ の最小化を行った。

4.3.1 位置合わせ誤差

位置合わせ誤差 $E_{alignment}(P)$ は、2 枚の距離

画像の間の対応点のユークリッド距離から求められる。対応点の集合を I 、対応点間の 3 次元距離を d_i とおくと、位置合わせ誤差は以下の式で定義される。

$$E_{alignment}(P) = \sum_{i \in I} \rho(d_i)$$

ここで ρ は推定関数、 P は model 画像と scene 画像の相対位置である。

本アルゴリズムでは推定関数としてローレンツ関数

$$\rho(x) = \frac{\sigma^2}{2} \log \left\{ 1 + \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2 \right\}$$

を用いた。結果として位置合わせ誤差は、対応点間のユークリッド距離を d_i とすると

$$E_{alignment}(P) = \sum_i \left[\frac{\sigma^2}{2} \log \left\{ 1 + \left(\frac{d_i}{\sigma} \right)^2 \right\} \right]$$

となる。 σ は外れ値をどこまで許容するかを決めるパラメータで、位置合わせを行うたびに決めることができる定数である。

4.3.2 エピポーラ誤差

まず、2 枚の Reflectance 画像から抽出した特徴点の組み合わせが与えられた場合のエピポーラ拘束条件を示す。

2枚の Reflectance 画像内の対応する特徴点の座標をそれぞれ

$$\tilde{m}_1 = \begin{pmatrix} m_{1,x} & m_{1,y} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{m}_2 = \begin{pmatrix} m_{2,x} & m_{2,y} & 1 \end{pmatrix}$$

とおき, 3次元座標上の位置を

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} M_x & M_y & M_z & 1 \end{pmatrix}$$

とおく. \tilde{m}_1 は model 画像上の, \tilde{m}_2 は scene 画像上の点である.

今, 2つカメラの相対姿勢を3行3列の回転行列 R_i , 3行1列の並進ベクトル t_i で表すことにすると, あらかじめ求めてあるカメラの内部パラメータ行列 A_i とあわせて, 2枚の Reflectance 画像の射影行列 P_1, P_2 を以下の式で表すことができる.

$$P_i = A_i \begin{pmatrix} R_i & t_i \end{pmatrix}$$

以上より, 特徴点 \tilde{m}_1, \tilde{m}_2 が満たすべき射影の方程式は以下のようになる.

$$s\tilde{m}_1 = P_1\tilde{M}$$

$$s\tilde{m}_2 = P_2\tilde{M}$$

ここで, $P_2 \in R^{3 \times 4}$ であるから, P_2 の擬似逆行列を P_2^+ とすると,

$$\tilde{M} = sP_2^+\tilde{m}_2 + (1 - P_2^+P_2)\xi$$

$$= sP_2^+\tilde{m}_2 + p_{2,null}$$

となる. ここで ξ はゼロでない任意の4次元ベクトル, $p_{2,null}$ は scene 画像のカメラ視点の3次元座標である.

これを上の射影の方程式に代入すると,

$$s\tilde{m}_1 = P_1\tilde{M}$$

$$= sP_1(P_2^+\tilde{m}_2 + p_{2,null})$$

$$= sP_1P_2^+\tilde{m}_2 + P_1p_{2,null}$$

$$= sP_1P_2^+\tilde{m}_2 + e$$

となる. 点 e は, model 画像と scene 画像のカメラ

視点を結んだ直線が, model 画像のカメラ画像平面と交わる点, すなわちエピポールである.

また, この式の両辺にベクトル e を外積とすると,

$$s[e]_{\times}\tilde{m}_1 = s[e]_{\times}P_1P_2^+\tilde{m}_2 + [e]_{\times}e$$

$$= s[e]_{\times}P_1P_2^+\tilde{m}_2$$

である. さらに両辺に \tilde{m}_1^T を左からかけると,

$$\tilde{m}_1^T[e]_{\times}\tilde{m}_1 = \tilde{m}_1^T[e]_{\times}P_1P_2^+\tilde{m}_2$$

となる. ここで $[e]_{\times}\tilde{m}_1$ は \tilde{m}_1 に垂直なベクトルであるから, 上式の左辺は必ずゼロになる.

ゆえに, ここで

$$F = [e]_{\times}P_1P_2^+$$

とおくと,

$$\tilde{m}_1^T[e]_{\times}P_1P_2^+\tilde{m}_2 = \tilde{m}_1^TF\tilde{m}_2 = 0$$

が成り立つ.

いま, model 画像上のエピポーラ線 l_1 は, エピポール e から放射状に引かれた直線であるので,

$$l_1\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2^TF\tilde{m}_1 = 0$$

と表されることがわかる.

このエピポーラ拘束条件を位置合わせの実現誤差として用いるためには, エピポーラ線と, 対応する点との距離を計算する必要がある.

今, model 画像上の点 \tilde{m}_1 と scene 画像上の点 \tilde{m}_2 が, Reflectance 情報から対応点であることが判明しているので, scene 画像中の点 \tilde{m}_2 に対応する model 画像上のエピポーラ線 l_1 と, model 画像上の点 \tilde{m}_1 との間のユークリッド距離を求め, また同様に \tilde{m}_1 に対応した scene 画像上のエピポーラ線 l_2 と点 \tilde{m}_2 との間のユークリッド距離を求めて合計すれば, それがエピポーラ誤差となる.

まず, エピポーラ線 l_1 と点 \tilde{m}_1 との距離は

$$d_1 = \frac{|\tilde{m}_2^T F \tilde{m}_1|}{\sqrt{l_{1,u}^2 + l_{1,v}^2}}$$

で計算でき, エピポーラ線 l_2 と点 \tilde{m}_2 との距離 d_2 も同様にして求めることができる.

よって, この対応点 \tilde{m}_1, \tilde{m}_2 に関するエピポーラ誤差 ε は

$$\begin{aligned} \varepsilon &= d_1 + d_2 \\ &= \frac{|\tilde{m}_2^T F \tilde{m}_1|}{\sqrt{l_{1,u}^2 + l_{1,v}^2}} + \frac{|\tilde{m}_1^T F \tilde{m}_2|}{\sqrt{l_{2,u}^2 + l_{2,v}^2}} \end{aligned}$$

以上より, ある対応点の組み合わせ i に関するエピポーラ誤差を ε_i とすると, エピポーラ拘束条件に対する実現誤差 $E_{epipolar}$ は, 以下のように書ける.

$$E_{epipolar}(P) = \frac{\sum_i \rho(\varepsilon_i)}{I}$$

ここで P は2つのカメラの相対姿勢を表す変数で, 回転行列 R と並進ベクトル t を含んでいる. また ρ は推定関数, I は特徴点の組み合わせの数である.

4.3.3 位置合わせ誤差とエピポーラ誤差の正規化

これまでに計算された位置合わせ誤差とエピポーラ誤差はそのままでは値が非常に異なるので, 適当な正規化を行う必要がある.

提案するアルゴリズムでは, 共役勾配法を用いて漸近的に誤差関数の最小化を行う. そこで反復の各ステージにおける初期位置を P_0 とし, その位置での位置合わせ誤差・エピポーラ誤差の値を保存しておき, 誤差の計算を行うたびに P_0 の値で割り算を行うことによって, 位置合わせ誤差とエピポーラ誤差の正規化を行うことにした.

よって最小化すべき誤差関数は

$$E(P) = \frac{E_{alignment}(P)}{E_{alignment}(P_0)} + \frac{E_{epipolar}(P)}{E_{epipolar}(P_0)}$$

で表されることになる.

5 実験結果

提案した手法の有効性を示すため, エピポーラ拘束を考慮しないアルゴリズムと, エピポーラ拘束条件を含めた位置合わせをおこなうアルゴリズムの比較実験を行った. 実験ではカメラ位置だけが異なる2枚の距離画像と, 対応する2枚の Reflectance 画像を用意し, Reflectance 画像上の特徴点を5組手で指定して, 提案したアルゴリズムを用いて位置合わせを行った. 実験に使用した画像は円筒形の物体を2方向から撮影したことを想定した仮想のデータである. 図2に, 位置合わせ開始前のカメラ位置で, 2枚の距離画像を3次元空間上に射影した結果を示した.

この画像2枚の位置合わせ実験を行った結果を以下に示す.

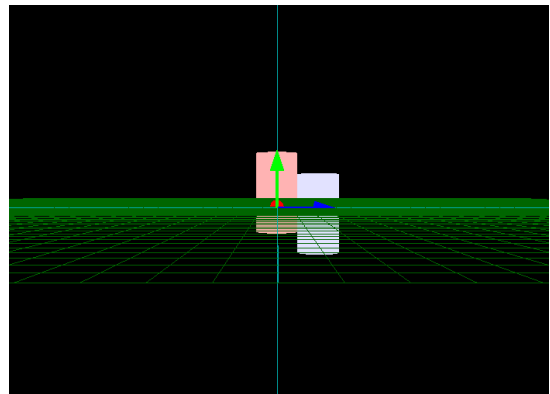


図2:位置合わせ実験開始前の相対位置

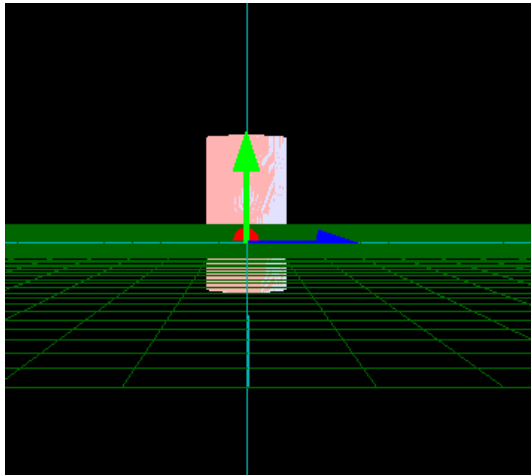


図 3:エピポラ拘束を利用した実験結果

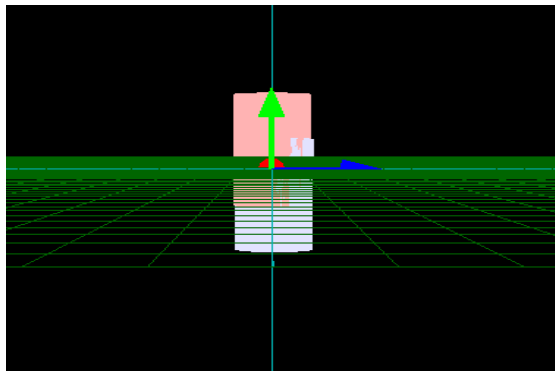


図 4:エピポラ拘束を利用しない実験結果

図 3 はエピポラ拘束を使ったアルゴリズムによる位置合わせ結果, 図 4 はエピポラ拘束を使わない従来のアルゴリズムによる位置合わせ結果である.

実験に使用したような平坦な物体の場合, point-to-point 評価の弱点である平行移動に関する不安定性が現れてしまい, エピポラ拘束を使わないアルゴリズムでは局所解に陥っている.

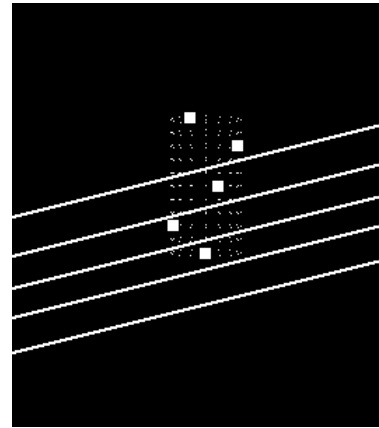


図 5:実験開始前のエピポラ線と特徴点

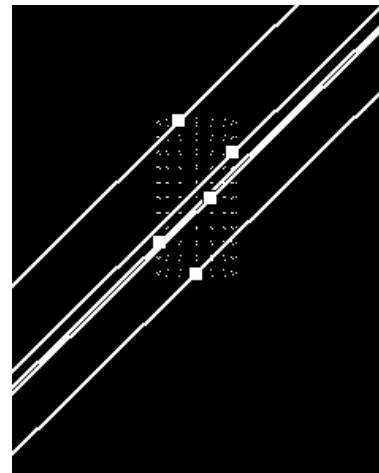


図 6:実験終了時のエピポラ線と特徴点

図 5, 図 6 は位置合わせ開始前・終了後のピンク色の画像におけるエピポラ線・対応する特徴点を図示したものである. 位置合わせの結果, エピポラ誤差(線と点の距離)が最小化されているのがわかる.

6 おわりに

実験に使用した円筒形のデータのように, 形状が単純なものの位置合わせを行う場合は, Reflectance 画像を使わない従来の手法では, 表面の模様など距離画像に現れない情報が使われないので, 局所解に陥りやすい. 本研究で提案した手法のように, Reflectance 画像の情報を併用した位置合わせを行うことによって, このような場合

のロバスト性を高めることができることがわかった。

今後は、ノイズを含んだ大量の距離画像を同時に位置合わせする場合もエピソード拘束による位置合わせが有効であるかを考察していきたい。

参考文献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKey. *A method for registration of 3-D shapes*, IEEE Trans Pattern Anal. Machine Intel. 14(2) pp.239-256, 1992
- [2] Y.Chen and G.Medioni. *Object modeling by registration of multiple range images*, Image and Vision Computing 10(3), pp.83-89, 1992
- [3] K. Nishino and K. Ikeuchi. *Robust Simultaneous registration of multiple range images*. In Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02, pp.454-461, 2002
- [4] Y.Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi. *Object shape and reflectance modeling from observation*, Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997, ACM SIGGRAPH, pp.379-387, August 1997.
- [5] D. Miyazaki, T. Oishi, T. Nishikawa, R.

Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase and K. Ikeuchi. *The Great Buddha Project: Modeling Cultural Heritage through Observation*, VSMM2000 (6th international conference on virtual systems and multimedia).

- [6] Ryo Kurazume, M.D.Wheeler, and Katsushi Ikeuchi. *Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image*, Workshop for "Data Fusion" at IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, 2001.
- [7] Ryo Kurazume, Ko Nishino, Zhengyou Zhang, and Katsushi Ikeuchi. *Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute*, ACCV2002, pp.23-25, 2002.
- [8] Stan Birchfield. Derivation of Kanade-Lucas-Tomasi Tracking Equation, <http://vision.stanford.edu/birch/klt/>
- [9] P.J. Neugebauer. *Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Image*, Proc. of the 1997 Int. Conf. On Shape Modeling and Application (SMA'97), pp.130-139, 1997