

位相限定相関法を用いた3次元物体の位置・姿勢推定方法

伊藤 憲彦* 中島 慶人†
財団法人 電力中央研究所

コンピュータグラフィックス(CG)などで表現された仮想空間と実際の空間を違和感なく融合する技術は複合現実感と呼ばれている。このような複合現実環境を利用した教育訓練システムを構築するためには、実空間にある物体の位置や姿勢を精度よく求め、その物体の姿勢に合致するように仮想空間を表示する必要がある。

2次元物体の位置・姿勢を求める方法として、フーリエ変換の位相項のみを使う位相限定相関法が開発されているが、3次元物体の場合、回転軸方向の検出が難しいという問題がある。本報告では上記問題を解決するために、相関強度を利用した回転軸の探索を行い、3次元物体の位置・姿勢推定を行った。

Three-Dimensional Position and Rotation Measurements using Phase Only Correlation

Norihiko ITOH Chikahito NAKAJIMA
Central Research Institute of Electric Power Industry

To develop mixed reality environment which is constructed by merging a real space and a virtual space, 3-D information of an object in the real space is needed. Especially, it is essential to measure the position and rotation angle of the object. A pattern matching algorithm called Phase Only Correlation(POC) for 2-D images has been proposed to measure the rotation angle and the position of the 2-D figures. However, it is impossible to use the POC for measuring the rotation angle of 3-D object directly, because of the variability of rotation axes. In this report, we describe a method of the position and rotation angle measurements between two 3-D objects using 3-D POC.

*E-mail: norihiko@criepi.denken.or.jp

†E-mail: nakajima@criepi.denken.or.jp

1 はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) などで表現された仮想空間と実際の環境 (実空間) を違和感なく融合する技術は複合現実感あるいは拡張現実感などと呼ばれている。このような複合現実感を利用することで、実物体に説明用 CG などを合成し、教育訓練システムを構築することが可能となる。

複合現実環境を実現するためには実物体と CG の位置関係を考慮した融合が必要である。2つの空間にずれが生じている場合、表現力を著しく低下させるだけでなく、間違った情報を与えることもある。このために実空間内の物体の位置や姿勢の推定を精度よく求める必要がある。物体の位置や姿勢の推定方法として、大きく分けて次の2つの方法が研究されている。

一つは、複合現実環境体験者や物体に磁気センサー等を取り付けて、空間における位置を直接計測する方法である。この方法では、体験者や物体にセンサー類を取り付けなければならないため複合現実環境はセンサーの有効範囲内に限定される。またセンサーが取り付けられていない物体は空間に固定しなければならない、自由に動かすことができなくなる。

二つめは体験者にカメラなどを取り付け、空間における目標物との相対位置を推定する方法である [1] [2]。この方法は、多くのバリエーションが存在する。その中で一般的に用いられている方法は、現実世界の物体とコンピュータが保持している物体基準データとを比較・照合することで、物体の位置・姿勢を推定する方法である。

二つめのカメラなどを利用した物体の位置・姿勢推定方法では、体験者が取得する情報 (計測データ) を活用できるようにあらかじめコンピュータ上に姿勢等を推定する基準となるデータ (基準データ) を記録しておく必要がある。これらの計測データや基準データの次元数や利用する情報によりさまざまな位置・姿勢推定方法が提案されている。

a. 計測及び基準データがともに2次元データの場合
画像検索を使う方法などがある。この場合物体を見る位置によって見え方が異なるため、基準

物体の画像を多数記憶する必要がある。

b. 計測データが2次元、基準データが3次元の場合
物体の特徴点を抽出し、基準物体とのマッチングから位置・姿勢を推定する方法などがある。測定物体の特徴抽出およびマッチングを精度良く処理するため、物体に画像処理用のマーカを組み込む方法がある [2]。マーカを用いることで測定物体の特徴を抽出しやすくしている。しかし、カメラ映像内のマーカの数や配置に制約が生じる。さらに、3次元情報を精度良く測定するためにはマーカの抽出を正確に行う必要がある。

c. 計測及び基準データがともに3次元データの場合
2次元画像では扱うことのできない奥行き情報を利用することができる。しかし、計測物体の3次元データの取得方法やデータ取得精度について評価がはっきりしていない可能性がある。

最近、コンピュータ技術の進展により多眼カメラを用いた3次元奥行き計測カメラなどが登場している。これらのカメラにより高速に物体の3次元形状情報を取得できるようになった。そこで、本報告では上記 c. について3次元位相限定相関法を使った位置・姿勢推定方法について提案する。2章では、位置・姿勢推定方法の基礎となる位相限定相関について述べる。3章では、3次元物体の位置・姿勢推定方法を提案する。4章はまとめである。

2 位相限定相関法

実空間と仮想空間を重ね合わせるためには、2つの空間の位置関係を調べる必要がある。2つの空間へ仮想的に同じ物体を置き、相関を使って空間の位置関係を調べる方法などがある。このとき相関のピーク位置ずれ量から空間の位置関係が計測できる。

このとき相関の計算方法として、フーリエ変換後の位相成分のみを使い相関を計算する方法 (位相限定相関法) がある。アルゴリズムの原理を図1に示す。位相限定相関法は、空間周波数を利用するため、エッジ

や特徴点といった幾何学的な特徴を抽出する必要がない。また、通常の相関に比べて識別能力が高い [3] [4] 特徴がある。

この位相限定相関法を 2 次元画像内の図形の位置・回転角度推定に利用する方法が提案されている [5]。図形の回転角度と移動量は別途計算する必要がある。

回転角度の算出方法は画像を極座標に変換したのちに位相限定相関法を利用する。極座標変換を利用することで xy 座標系での回転角度成分を極座標上の平行移動成分に変換する。変換後、位相限定相関を計算し回転角度を推定する。基準画像内の図形が計測画像内の図形と同じ向きになるように推定した回転角度で、基準画像を回転させる。その後、再度位相限定相関を用いて平行移動成分を推定する。これらの一連の計算により基準画像との相対的な回転角度や平行移動成分が明らかになる。

この 2 次元画像の位置・回転角度推定アルゴリズムの概要は図 2 の通りである。この手法を利用した指紋認証システム [6]、画像の位置計測センサ [7] 等が開発されている。

3 位相限定相関の 3 次元への拡張

本章では、位相限定相関法を 3 次元空間に拡張し、3 次元物体の位置ずれ、回転角度を推定する方法を提案する。提案方法の実現に必要な前提条件は次の通りである。

- a. 計測に用いる 3 次元物体は剛体である。
物体の周波数成分が変形の影響を受けないようにするためである。
- b. 3 次元物体の形状データは空間を格子状に分割した基本構成単位の集まりとして表現されているものとする。
提案する方法では、3 次元物体形状データのフーリエ変換結果を使うため、格子状の 3 次元空間に物体形状データを分割する必要がある。
- c. 3 次元物体の形状は軸対称形ではない。
3 次元物体の形状が軸対称である場合、回転角

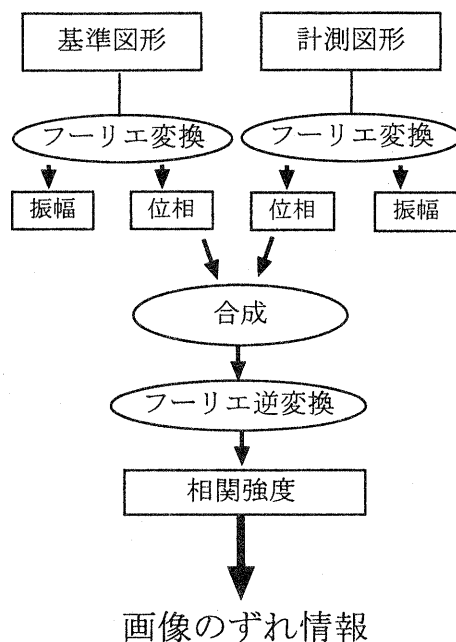


図 1: 位相限定相関法の原理

度の推定を誤る場合がある。このため回転角度を推定する物体は軸対称でないものとする。

この前提条件を基にして、位相限定相関を用いた位置・姿勢の推定方法を述べる。

3.1 位置・姿勢推定方法の 3 次元への拡張

2 次元図形の場合、回転軸の方向は必ず画面の法線と同一となる。しかし、3 次元物体の場合は、回転軸の方向が自由に变化する。このため 3 次元の回転角度を推定するためには、例えば回転成分を回転軸の方向と回転角度のように記述する必要がある。

3 次元モデル作成ソフトなどでは、 x, y, z の 3 軸を中心とする回転成分として表現している。本報告でもこれらの軸を中心とした回転パラメータにより姿勢を記述する。注意しなければならないのは 3 次元の回転行列には可換性が無いことである。そこで回転の順序を次のように決める。まず x 軸を中心に、形

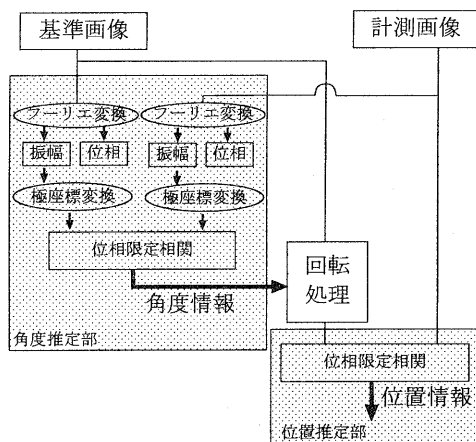


図 2: 位置・回転角度推定方法

状データを ψ 回転させる。次に y 軸を中心に θ 回転させ、最後に z 軸を中心に ϕ 回転させる。

このような回転パラメータ (ψ, θ, ϕ) を定義しても、3次元の回転行列には可換性が無いため次のような問題がある。ある物体に対して回転パラメータ (ψ_1, θ_1, ϕ_1) の回転を行った後、さらに (ψ_2, θ_2, ϕ_2) 回転させたとする。このとき同じ物体を ($\psi_1 + \psi_2, \theta_1 + \theta_2, \phi_1 + \phi_2$) 回転した場合と必ずしも物体の向きが一致しない。この結果、座標変換を用いて回転角度変化を座標上での平行移動成分に変換できないため位相限定相関を用いた姿勢推定問題を困難なものにしている。

上記問題を解決するため、まず物体の回転軸方向が既知な場合の回転パラメータ推定方法を考える。次に回転軸が不明な物体に関しては等角度に回転パラメータの一部 (ψ, θ) を動かし、相関値が最大となる ϕ を探索する方法で、回転パラメータを推定する。

3.1.1 物体の回転軸方向が既知の場合

物体の回転軸が既知の場合、物体の回転パラメータのうち (ψ, θ) が既知であるものと同じである。話を簡単にするために、回転軸を xyz 座標系の z 軸を中心とするような物体形状モデルについて考える。

残る回転パラメータ ϕ を推定するため、円柱座標

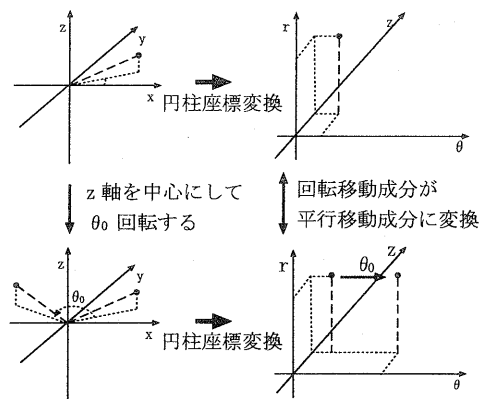


図 3: 回転角度と円柱座標変換

変換を利用する。円柱座標変換を利用することで z 軸を中心とする回転角度成分を円柱座標上の平行移動成分に変換でき、平行移動成分を推定する位相限定相関が利用できる。図 3 は z 軸を中心とする回転角度成分が円柱座標変換により平行移動成分に変換できることを示している。

3.1.2 物体の回転軸方向が未知の場合

物体の回転軸が未知の場合、回転軸の方向に相当する回転パラメータ (ψ, θ) を求めることができれば、3.1.1 の方法で回転パラメータ (ψ, θ, ϕ) を推定できる。このため回転軸の方向を検索する方法について述べる。ここで、基準図形と入力図形の相関が強いほど相関関数のピークは急峻になることを利用する。具体的には ψ, θ が等間隔になるように変化をさせ、相関を計算する。相関値が最大となる回転パラメータより物体の姿勢を推定する。

この 3 次元物体の回転角度が未知である場合の位置・姿勢推定アルゴリズムを図 4 に示す。このアルゴリズムは大きく分けると回転角度推定部分と位置ずれ推定部分に分割することができる。

(a) 回転角度推定部分

適切なサンプル数で基準物体の回転軸方向を設定する。次に設定した回転軸方向について、

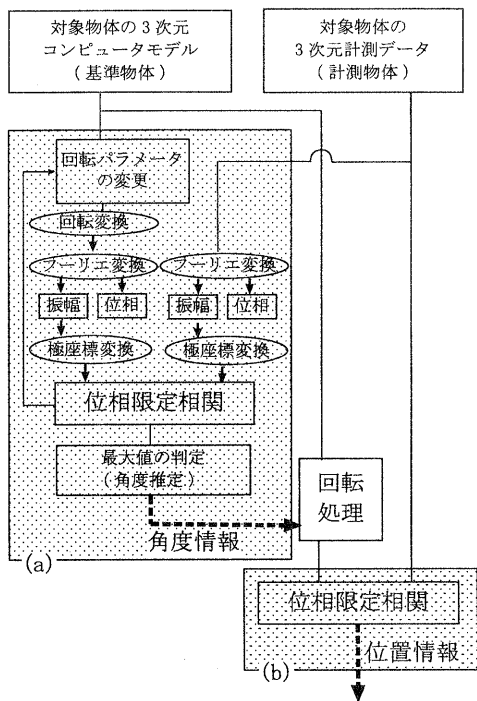


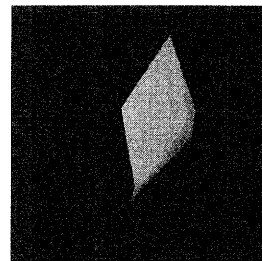
図 4: 位置・回転角度推定アルゴリズム

3.1.1 の回転角度算出方法を用いて基準物体と計測物体の相関値を計算する。設定した回転軸方向を変化させ、同様に相関値を計算する。相関値が最大となる回転パラメータから、姿勢情報を推定する。

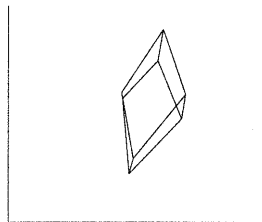
(b) 位置ずれ推定部分

計測物体と向き(回転角度)の整合した基準物体を使って位相限定相関を計算する。相関のピークから物体の位置ずれを推定する。

上記2つの部分間にある回転処理は、2次元の方法と同様に、基準物体が計測物体と同じ向きになるように上記の回転角度推定結果を用いて、基準物体を回転させる。



射影図



ワイヤーフレーム表示

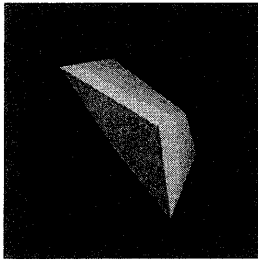
図 5: 模擬計測形状データ

3.2 実験結果

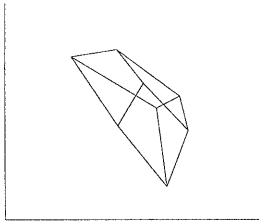
図 5, 図 6 のような物体形状データの回転角度を推定することが出来るか実験を行なった。実験結果を表 1 に示す。このデータの大きさは x, y, z 軸にそれぞれ 64 dot のデータである。この計測物体は x 軸を中心に、基準物体を 160 度回転した後、 y 軸を中心に 60 度回転し、さらに z 軸を中心に 30 度回転させた結果である。

このような模擬計測物体に対し、位相限定相関法を使い回転角度を推定した結果、 x 軸を中心に 157.5 度回転した後、 y 軸を中心に 61.875 度回転し、さらに z 軸を中心に 28.125 度回転させたものとなった。このとき回転パラメータ (ψ, θ) は、等間隔に 64×32 回変更した。回転角度成分の誤差は角度分解能程度に収まっている。また平行移動成分の推定では数 dot の誤差の範囲で収まっている。誤差の原因は、回転角度の量子化誤差によるものや計算時の丸め誤差である。

計算時間は SGI 社製 OCTAIN (CPU:R10000 250 MHz \times 2) を用いたところ、およそ 2 時間であった。



射影図



ワイヤフレーム表示

図 6: 基準形状データ

3.3 位置・姿勢推定方法の計算量

3次元物体の位置・姿勢推定方法で計算時間に一番大きな要因を与えるものは、フーリエ変換の計算時間と計算回数である。フーリエ変換の回数が少ない場合は、座標変換の計算時間および計算回数も計算時間に影響を与える。

位置・姿勢推定方法の計算量について考察する。まず基準物体と計測物体の移動量を推定する場合、3回の3次元フーリエ変換が必要である。次に回転角度を算出する場合、現在の処理方法では、回転パラメータの一部(ψ, θ)を仮定した時の相関値を計算し、そのあとで(ψ, θ)を変更し、最大となる相関値を調べるアルゴリズムである。この回転角度推定部分のアルゴリズムを図7に示す。このとき、共通に使える計算結果などを使い、図7(a)の部分だけ繰り返すようにすると、フーリエ変換の計算回数は(仮定した ψ, θ の組み合わせの数) $\times 3 + 2 = 6,146$ 回となる。この計算回数に移動量を推定するのに必要な計算回数を加えると、3次元物体の位置・姿勢を計算するためには6,149回の3次元フーリエ変換が必要であり、前述の

表 1 実験結果

回転角度成分	x 軸	y 軸	z 軸
設定値 (deg)	160	60	30
推定値 (deg)	157.5	61.875	28.125

平行移動成分	x 軸	y 軸	z 軸
設定値 (dot)	0	0	-10
推定値 (dot)	-1	-1	-12

(データサイズ $64 \times 64 \times 64$ dot)

マシンでおよそ2時間の計算時間がかかった。

この計算方法を利用した場合、明らかに移動量を計算する時間より回転パラメータを計算する時間のほうが全体の計算時間に占める割合が高いことがわかる。よって、回転パラメータを推定する計算の削減、特に回転パラメータ ψ, θ の推定計算を削減することが全体の計算量の削減に結びつくといえる。

3.4 計算量削減方法と考察

3.4.1 事前処理による計算量の削減 (高速化手法 a)

2.1節で提案した計算方法では、仮想的に決定したx軸、y軸を中心とするような回転角度 ψ, θ を徐々に変化させ、基準物体や計測物体のフーリエ変換を計算し、周波数成分を求めている。しかし、変化させる ψ, θ を等間隔に変化させる場合やあらかじめ変化量を決めている場合について、次のことがいえる。

変化させる ψ, θ の値が決まっている場合、それぞれの値に対する基準物体のフーリエ計算結果をあらかじめ計算しておくことで、計算量を減らすことができる。具体的には、(ψ, θ)そのすべての組み合わせについて基準物体に対して回転変換と空間周波数成分の計算をあらかじめ行う。つまり、図7(b)の部分あらかじめ計算しておく。この計算量削減方法を高速化手法 a とする。

この手法を用いると、必要なフーリエ変換の計算回数を2056回に削減できた。前述のSGI社製コンピュータを使い計算すると、およそ40分の計算時間となり、ほぼ1/3の計算時間で処理ができる。

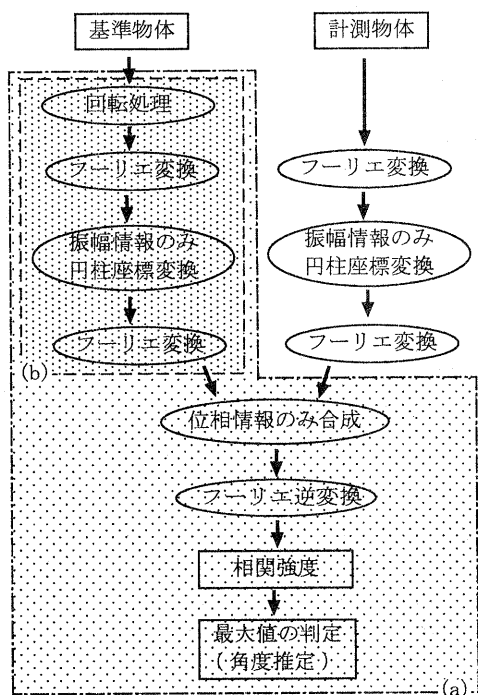


図 7: 3次元回転角度推定アルゴリズムの改良

3.4.2 時系列による微小角度を利用した計算量削減 (高速化手法 b)

ここでは微小時間内の角度変化に着目して計算量を削減する方法 (高速化手法 b) について述べる。ある微小時間 dt の間に 3次元物体の回転パラメータが $(\psi_0, \theta_0, \phi_0)$ から $(\psi_0 + d\psi, \theta_0 + d\theta, \phi_0 + d\phi)$ へと変化したとする。このとき位相限定相関を使って回転パラメータを推定するには、仮想的な (ψ, θ) の組み合わせとして $(\psi_0 + d\psi, \theta_0 + d\theta)$ の計算をすれば良い。実際には、 $d\psi, d\theta$ の値が不明であるため、微小時間 dt 前の回転パラメータ (ψ_0, θ_0) 付近を探索する。

回転角度の変化が $d\psi \approx d\theta \approx 2\pi /$ (空間 (角度) 分割数) (rad) 程度の微小な変化を想定した場合、位置・回転角度の推定に必要な 3次元フーリエ変換の計算回数は 80 回となる。また、計算時間はおよそ 3分となる。

3.4.3 組み合わせによる計算量削減 (高速化手法 a+b)

3.4.1 および 3.4.2 の手法を組み合わせることによりさらに計算回数を削減することができる。3.4.2 と同様の条件下では、高速化手法 a を取り入れることにより、位置・回転角度の推定に必要な 3次元フーリエ変換の計算回数は 30 回となる。ただし、3.4.1 で述べたように仮想的な回転パラメータそれぞれについて、基準物体の空間周波数成分をあらかじめ計算しておくものとする。

このような計算手法をとった場合、フーリエ変換の計算回数が非常に減るために全探索を行う場合に比べて高速な処理が可能である。上記の処理により回転角度を推定した場合およそ 1分程度の計算時間となる。計算時間が単純にフーリエ変換の計算回数に比例していない理由は、3次元フーリエ変換の計算回数が減り、全体の計算量に占める座標変換などその他の計算の割合が増えてきたためである。

位置・姿勢推定方法、事前処理による計算量削減方法 (高速化手法 a)、微小時間の回転角度変化に着目した計算方法 (高速化手法 b)、および 2つの手法の組み合わせ (高速化手法 a+b) それぞれについてフーリエ変換の回数と計算時間について表 2 に示す。

3.4.4 計算量削減の留意点

高速化手法 a の場合、計算をするために前処理として x 軸、 y 軸を中心とする回転 ψ, θ それぞれに対応する基準物体形状データを準備し、周波数成分を計算しておく必要がある。また、その計算結果を記録しておかなければならないため、大きな記憶領域も必要である。

高速化手法 b については、パラメータを求めようとする物体が高速に回転している場合、すなわち回転パラメータの変化量 $d\psi, d\theta, d\phi$ が大きい場合、回転パラメータの探索範囲は広がり、フーリエ変換の計算回数は増加するという問題がある。そのため、全体の処理時間が増加し、さらに回転パラメータの変化量は大きくなってしまふ。このアルゴリズムでは高速な回

表2 実験結果 (データサイズ 64 × 64 × 64dot)

推定方法	FFT 計算回数	計算時間	備考
提案方法	6,149	2 時間	
高速化手法 a	2,056	40 分	データ記憶領域が必要
高速化手法 b	80	3 分	追従できる微小回転角度は $\pm 2 \times$ (角度分解能) 以内
高速化手法 a+b	30	1 分	データ記憶領域が必要 追従できる微小回転角度は $\pm 2 \times$ (角度分解能) 以内

※角度分解能 = $2\pi / (\text{空間分割数})$

転変化をする物体の姿勢推定処理には向いていない。高速化手法 a+b の場合は、上記の留意点それぞれについて考慮する必要がある。

4 おわりに

本報告では任意の回転軸をもつ物体の回転角度と位置ずれ量を推定するアルゴリズムを開発した。本手法を用いることで、あらかじめ形状データなどが入手可能な物体に関しては、3次元のデータ入力を行なうことで、位置ずれや回転角度を推定することが可能となる。

複合現実環境を実現するためにはさらに処理速度の高速化が求められるが、解決方法の一つとして、フーリエ変換や座標変換を専用のハードウェアで処理する方法がある。近年のコンピュータの処理能力や半導体技術の向上により、3次元フーリエ変換や座標変換は以前に比べて高速に処理することが可能となった。現在ソフトウェアで処理している変換処理の大半を専用ハードウェア処理に置き換えることで全体の処理時間を大幅に短縮できる。あるいは、本アルゴリズムは並列化が可能であるため、複数のコンピュータを使った並列処理なども考えられる。

現在は CG モデル作成ソフトを使い入力データを作成しているため、ノイズのない理想的な環境でのパラメータ推定と同等である。今後は、実際にカメラで撮影する時に生じる隠れの問題などの考察を行なう。このため、実際に物体を撮影し、その物体のパラメータを推定する実験を行なう。

参考文献

- [1] 井上 剛毅, Long Quan, 大田 友一, “複合現実感のための線形的手法による仮想物体像合成”, 信学技報, PRMU97-112, pp. 7-12, 1997.
- [2] 大隈 隆史, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “ビデオシースルー型拡張現実のための実画像からのカメラパラメータの実時間推定”, 信学技報, PRMU97-112, pp. 13-20, 1997.
- [3] 中山 亨, 河田 聡, 南 茂夫, “フーリエ位相相関を用いたパターン識別”, 第 22 回 画像工学コンファレンス, pp. 89-92, 1991.
- [4] 小林 孝次, 中島 寛, 青木 孝文, 川又 政征, 樋口 龍雄, “位相限定相関法の原理とその応用”, テレビジョン学会 技術報告, Vol. 20, No. 41, pp. 1-6, 1996.
- [5] C.Nakajima, N.Itoh, M.Pontil, T.Poggio, “Object Recognition and Detection by a Combination of Support Vector Machine and Rotation Invariant Phase”, ICPR 2000, 2000.
- [6] 中島 寛, 小林 孝次, 青木 孝文, 川又 政征, 樋口 龍雄, “位相限定相関法の原理と指紋照合への応用”, 第 2 回 画像センシングシンポジウム講演論文集, pp. 15-20, 1996.
- [7] 樋口 勝己, “位相限定相関法を活用した画像センサ”, 画像ラボ 3月号, pp. 27-31, 1999.