

光切断法による複数運動剛体の形状計測

船富 卓哉^{†a)} 飯山 将晃^{††} 角所 考^{†††} 美濃 導彦^{†††}

Light Stripe Triangulation for Multiple Moving Objects

Takuya FUNATOMI^{†a)}, Masaaki HIYAMA^{††}, Koh KAKUSHO^{†††},
and Michihiko MINOH^{†††}

あらまし 本論文では、光切断法による形状計測を複数運動剛体にも適用できるように拡張する。光切断法では運動剛体を計測すると獲得される形状がひずんでしまうが、計測対象の剛体運動が既知であればそのひずみを補正することができる。計測対象が互いに異なる運動をする複数の剛体からなる場合、そのうちの一つの剛体の運動を用いて点群すべてに対するひずみの補正を行うと、その剛体から得られた点群はひずみのない形状（実形状）を呈するが、異なる剛体から得られた点群は更にひずみ、本来とは異なる形状（偽形状）を呈し、これらが一緒に獲得されてしまう。そこで本論文では、計測対象のシルエットを用いて補正形状から偽形状を検出し、これを除くことで各剛体の実形状を獲得する手法を提案する。複数運動剛体に対する形状計測実験を行い、提案手法の有効性の検証、計測精度の評価を行った。更に、手形状の計測実験を行い、複数姿勢での形状を再構成できるモデルを構築した。

キーワード 光切断法, 形状計測, 運動物体

1. ま え が き

形状モデリングを目的として、様々な実物体に対する三次元形状計測の研究が盛んに行われている。三次元形状の計測手法は様々提案されているが、その中でも光切断法は、計測対象の表面が texture-less であってもその凹凸形状を高精度に計測できる点において、視体積交差法やステレオ法などの他の手法に対して優位であるといえる。光切断法は、計測対象の表面がレーザー光を吸収しなければ適用できるため、人体 [1], [2] や文化遺産 [3], [4] など、様々な物体の形状計測に利用されている。

一方、視体積交差法やステレオ法などの他の手法に比べて光切断法が不利な点の一つとして、計測に時間がかかることが挙げられる。光切断法では計測対象に

対してスリットレーザを照射し、その反射光を頼りに形状を計測する。一瞬で計測できるのはレーザが照射されている部分の形状だけである（以降では部分形状と呼ぶ）ため、物体全体の形状を獲得するためには物体全体をレーザで走査する必要があり、これに時間を要する。もし、レーザを走査している間に対象物体と計測装置の位置関係が変化すると、その影響で獲得した形状にひずみが発生してしまい、正確な形状を獲得することができなくなる。そのため一般的には、光切断法は静止剛体を対象とした形状計測で用いられる。これに対し本研究では、例えば人の手や身体、生きたままの昆虫などのように、計測の間完全に静止させておくことができない物体の形状を、光切断法を用いてひずみなく計測することを目的とし、光切断法の拡張を行う。

計測対象が単一の剛体である場合には、計測対象と計測装置の位置関係の変化（剛体変換）を計測し、これを用いて獲得形状に発生したひずみを補正することで正確な形状（実形状）を獲得する手法が提案されている [3], [5], [6]。しかし、計測対象が人の手や身体、昆虫のように、ほとんど剛体とみなすことができる複数の部分から構成され、それぞれが異なる運動をする場合には、計測対象を構成するそれぞれの部分の剛体変

[†] 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 京都大学大学院経済学研究所, 京都市
Graduate School of Economics, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{†††} 京都大学学術情報メディアセンター, 京都市
ACCMS, Kyoto University, Yoshida-Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: funatomi@mm.media.kyoto-u.ac.jp

換がすべて獲得できたとしても、それぞれの剛体の実形状を獲得するのは次のような理由から困難である。

計測対象が単一の運動剛体である場合には、各時刻において獲得される剛体変換は一つであり、その時刻に光切断法で獲得される部分形状（レーザが照射されている部分の形状）全体をその剛体変換に基づいて補正すればよい。しかし、計測対象が S 個の異なる運動をする剛体からなる場合、各時刻において獲得される剛体変換は S 個となる。これに基づいてそれぞれの剛体 s に対する実形状を得るためには、部分形状全体の中から剛体 s の形状だけを選び出し、剛体 s の剛体変換を用いて補正する必要がある。しかし、計測対象のごく一部の形状を表している部分形状の中から、剛体 s の形状だけを選び出すことは困難である。

一方、単一の運動剛体に対する場合と同様に、剛体 s の剛体変換だけを用いて部分形状の全体を補正することを考えてみる。剛体 s についてはひずみのない実形状が得られるが、部分形状は剛体 s と異なる他の剛体から獲得された形状も含む。これを剛体 s の剛体変換で変換すると、更にひずんでしまい本来とは異なる形状を呈する。本論文では、こうして発生した本来とは異なる余分な形状を偽形状と呼び、これを検出・除去することで、各剛体の実形状だけを獲得する手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2. で光切断法の原理、及び、複数運動剛体へ適用したときの問題点について述べる。3. では、ひずみの補正により発生する偽形状とそれを検出する手法について述べる。4. では、複数運動剛体を用いた実験を行い、提案手法が偽形状の検出に有効であることと、精度評価を行った結果を示す。また、手形状の計測を行い、複数の姿勢における形状を再構成できるモデルの構築を行う。5. では、まとめと今後の課題について述べる。

2. 光切断法と運動剛体に対する拡張

2.1 光切断法の原理

光切断法による三次元形状計測では、物体に照射したスリットレーザの反射光をカメラで観測することで、レーザ光が照射されている物体表面の三次元形状を三角測量で求める。このとき、反射光が観測できたカメラの各画素でその場所の三次元位置を計算するため、形状は三次元空間中の点の集合、つまり点群として得られる。

カメラで獲得される 1 枚の画像からは、スリット

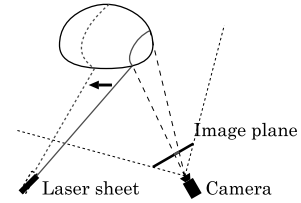


図 1 光切断法による物体形状の計測
Fig. 1 Principle of the light stripe triangulation.

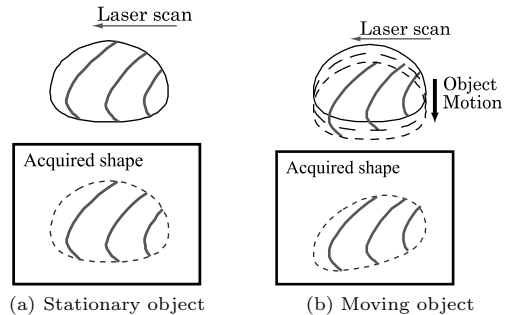


図 2 計測形状が受ける運動の影響
Fig. 2 Problems of shape distortion due to object motion.

レーザ光が照射されている部分の形状しか獲得できないため、計測対象全体の三次元形状を獲得するためには物体表面全体をスリットレーザで走査する必要がある（図 1）。このとき、物体の形状を詳細に獲得するためには、レーザ走査をカメラの分解能及びフレームレートに合わせてゆっくり行う必要があり、計測にもその分だけ時間がかかる。

2.2 光切断法の単一運動剛体に対する拡張

光切断法では、静止剛体（図 2 (a)）に対してはその形状を正確に獲得することができる。しかし、運動剛体（図 2 (b)）に対してはスリットレーザを走査する間に物体が（図の場合は下方へ）動いてしまうため、そのままでは計測形状がひずんでしまい、実際の形状（本論文では実形状と呼ぶ）とは異なる形状が獲得されてしまう。

計測対象が単一剛体である場合、光切断法を行っている様々な時刻で得られる点群と、各時刻における計測対象の剛体変換が得られていれば、次のような方法で実形状を獲得することができる。まず、計測装置を基準とした、計測装置から獲得される点群を表現する座標系（計測座標系）を Σ^e 、計測対象を基準とした、計測対象の実形状を表現する座標系（物体座標系）を Σ^o と表すことにする。時刻 t における計測装置と物

体の位置関係から定まる変換を $W(t) : \Sigma^e \mapsto \Sigma^o$ と表すことにする．この変換 $W(t)$ は 6 自由度をもつ剛体変換行列によって表すことができる．

ある時刻 t で、物体表面の部分形状を N_t 個の点 $p_{t,n}^e \in \Sigma^e$ ($n = 1, \dots, N_t$) として獲得したとする．通常の光切断法では、計測装置と計測対象の位置関係は一定であり、座標変換 $W(t)$ は時間に対して不変となる．このとき、物体座標系の取り方には任意性があることから、 $\Sigma^e = \Sigma^o$ とすれば、 $W(t) = I$ とできる．そのため、点 $p_{t,n}^e$ を物体座標系 Σ^o で表現すると、その座標 $p_{t,n}^o$ は、

$$p_{t,n}^o = p_{t,n}^e \quad (1)$$

とでき、計測装置から得られた点群を変換しなくても、計測対象の実形状を獲得することができる．

一方、計測対象が単一の運動剛体である、あるいは計測装置が運動する場合、 Σ^e と Σ^o の関係を表す変換 $W(t)$ は時間とともに変化することになる．つまり、静止剛体を静止した計測装置で計測したときとは異なり、 $W(t) = I$ とすることはできない．しかしこの場合でも、剛体変換 $W(t)$ が既知であれば、次式に従い、物体座標系 Σ^o における座標 $p_{t,n}^o$ を計算することができる．

$$p_{t,n}^o = W(t)p_{t,n}^e \quad (2)$$

以上のように、計測対象や計測装置が運動している場合には、計測対象が静止している場合と同じように $W(t)$ による影響を無視してしまうと実形状は得られないが、各時刻における剛体変換 $W(t)$ が既知であれば式 (2) によって物体座標系における実形状を獲得することができる (図 3)．このように、剛体変換 $W(t)$ を用いて計測形状を物体座標系へ変換することで、光切断法で獲得した形状のひずみを補正することが

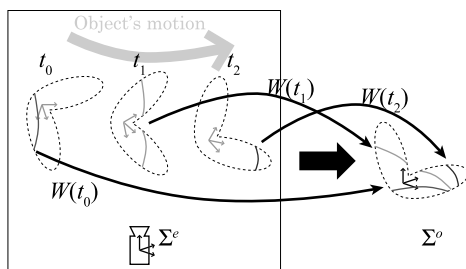


図 3 光切断法の単一運動剛体への拡張
Fig. 3 Extention for single moving object.

きる．

計測対象全体が静止しており、計測装置が運動するような状況に対して、上述のような拡張を行った手法はこれまでも提案されている．Polhemus 社の FASTSCAN [5] は、ハンドヘルド型の計測装置を自由に動かして物体表面を走査することで、計測対象の形状を計測する．この装置では、形状計測のセンサに磁気式位置センサを取り付けることで各時刻における変換 $W(t)$ の獲得を実現しており、実形状を獲得することができるになっている．また藤田らは、磁気式位置センサの代わりに六つの LED を付け、その三次元位置をステレオ計測することで変換 $W(t)$ の獲得を実現するシステムを提案している [6]．更に長谷川らは、気球に Time of Flight 方式のレーザ形状計測装置を搭載し、地上にある遺跡や建物を計測する際に、遺跡や建物などを計測した形状が気球の揺れの影響でひずんでしまう、光切断法の場合と同様の問題に対処するため、変換 $W(t)$ を計測装置に内蔵されたビデオカメラから得られる連続画像を用いて推定し、計測形状に発生するひずみを補正している [3]．

2.3 複数運動剛体への適用と問題点

計測対象が人の手や身体、生きたままの昆虫のように、複数の部分から構成され、それぞれが異なる運動をする物体の形状を計測する場合を考える．各部分がほとんど剛体とみなすことができ、それぞれの剛体に対して剛体変換が得られたとすると、各剛体に対するひずみのない形状は、計測で得られたひずんだ形状のうちその剛体に対応する部分を、その剛体の運動を表す剛体変換を用いて補正すれば獲得することができる．つまり、光切断法で獲得した点群を各剛体に分類し、それぞれに対してひずみの補正を行えば、各剛体の実形状を獲得することができる．

この考えに基づいて、我々は身体動揺がある人体に対して、人体を構成する各体節のひずみのない形状を獲得する手法を提案した [1]．ひずみの補正に必要な各体節の剛体変換は、光切断法による形状計測とともに、各体節に対して貼付したマーカの位置をステレオ計測することで推定した．また、点群の各体節への分類は手動で行った．分類が手動で行えたのは、被計測者が身体動揺による微小な運動しかない場合を想定していたためである．この想定のもとでは、発生するひずみも微小であり、獲得形状はほぼ人体の形をしているため、獲得形状のうちどの部分がどの体節に属しているかを比較的容易に判断することができた．しかし、

幼児や生きている昆虫など、全く静止してもらうことができないような計測対象を光切断法で計測した場合には、獲得した形状のひずみが大きくなり、原形をとどめないため、各体節への分類は手動では困難となる。

形状を各体節へ自動的に分類する手法がいくつか提案されてきた [7] ~ [9] が、これらが対象としてきたのはいくつかの姿勢で獲得したひずみのない全体形状であった。そのため、原形をとどめないほどひずんでしまった形状にはこれらの手法を適用することができない。

3. 提案手法

本論文では、複数運動剛体を光切断法で計測して得られたひずんだ形状を、各剛体へ分類してからひずみの補正を行うのではなく、ひずんだ形状全体に対して先にひずみの補正を行い、そのあと分類を行うことで各剛体の実形状を獲得する手法を提案する。ひずんだ形状全体は様々な剛体から計測された形状を含んでいる。このような全体形状に対し、ある剛体の剛体変換をもとにひずみの補正を行うと、その剛体から得られた形状は正しく補正され実形状を獲得できるが、異なる剛体から得られた形状は実際とは異なる形状に補正されてしまう。本論文ではこのような誤った補正により発生する形状を偽形状と呼ぶ。

ひずみを補正して得られた形状は実形状と偽形状の両方を含むため、実形状を得るためにはこれらを区別する必要がある。そこで本論文では、様々な時刻で観測した計測対象全体（すべての剛体）のシルエットを用いることで偽形状を検出する手法を提案する。各剛体について、ひずみを補正して得られた形状を様々な時刻で獲得されたシルエットに投影すると、実形状はあらゆる時刻において必ずシルエット内部に投影される。これに対し、偽形状は実際とは異なる形状であるため、常にシルエット内部に投影されるとは限らない。そのため、シルエットの外部に一度でも投影されるような形状は偽形状であるといえ、これらを除去したものを実形状として獲得する。

3.1 ひずみの補正による偽形状の発生

まず、計測対象を構成する各剛体に対して、その剛体変換を用いて点群全体を変換することを考える。計測対象が異なる運動をする S 個の剛体であるとして、各剛体 s に対して物体座標系 Σ^{os} を設定し、時刻 t における Σ^e から Σ^{os} への変換 $W^s(t) : \Sigma^e \mapsto \Sigma^{os}$ がすべて得られているとする ($s = 1, \dots, S$)。ここで、あ

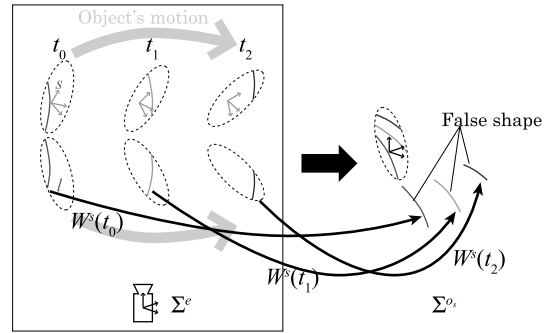


図 4 偽形状の発生
Fig. 4 False shape in undistortion.

る剛体 s の形状を獲得するため、単一運動剛体を観測したときと同様に、各剛体 s の変換 $W^s(t)$ を用いて、計測装置から得られた点群全体 $p_{t,n}^e$ ($n = 1, \dots, N_t$) を変換し、物体座標系 Σ^{os} における点群 $p_{t,n}^{os}$ を獲得した場合を考える (図 4)。このとき、点群 $p_{t,n}^e$ のうち、剛体 s の表面から獲得されたものは、変換によって剛体 s の実形状を形成する。しかし、点群 $p_{t,n}^e$ には (剛体 s 以外の) 他の剛体の表面から獲得された点も含まれている。それらが $W^s(t)$ を用いて変換された座標にはもともと剛体 s や他の剛体の表面はなく、それらは誤った形状を形成することになる。これが偽形状である。

3.2 偽形状の検出

空間中で複数の剛体が運動している状況を考える。剛体はそれぞれ異なる運動をしているため、計測座標系 Σ^e において、計測対象が占有する空間領域 (占有空間) は時間とともに変化する (図 5(a))。一方、この占有空間をある剛体 s の物体座標系 Σ^{os} で考えると、剛体 s は常に同一の空間領域を占有し続けるのに対し、他の剛体は、剛体 s と全く同じ運動をしないう限り、時間とともに占有する空間領域が変化していく。以上より、物体座標系 Σ^{os} で計測対象全体が占有する領域を考えたとき、剛体 s の領域は常に占有され続け、一度でも占有空間の外 (非占有空間) になる領域は剛体 s に含まれないといえる (図 5(b))。物体座標系 Σ^{os} において、光切断法で獲得した点群 $p_{t,n}^{os}$ のうち、剛体 s の実形状を形成する点群は常に占有空間に含まれるため、一度でも非占有空間に含まれるような点は偽形状であると判断できる。

物体形状が未知である以上、占有空間、あるいはその補空間である非占有空間を正確に獲得することは

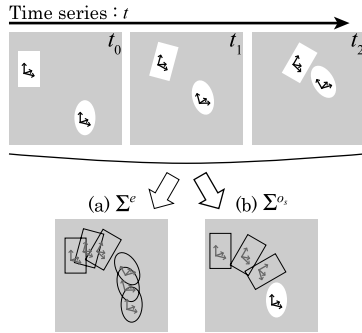


図 5 物体が占有する空間領域の変化
Fig. 5 Transition of spatial occupancy.

きない。しかし、非占有空間の部分空間であれば、計測対象のシルエットに基づいて獲得することができる。シルエットとは、カメラ画像中で計測対象が写っている領域のことである。このような領域は、あらかじめ背景の画像を獲得しておけば、それと計測対象を撮影した画像の差分をとることによって比較的容易に獲得することができる。

空間中でカメラ画像中のシルエットの外に投影されるような領域は非占有空間であるといえる。一方、シルエットの内部に投影される領域は、物体の占有空間だけではなく、非占有空間も一部含まれている。そのため、シルエットから得られる非占有空間は完全なものではない。しかし、必ずしもすべての時刻における完全な非占有空間が必要なわけではなく、一度でも非占有空間に含まれる点は、偽形状として検出される。そのため、偽形状を形成するすべての点が一度はシルエット外に投影されるよう、様々な時刻での観測ができれば、偽形状をすべて検出することができる。各剛体が微小にしか運動しない場合には、シルエットの変化も微小になり、偽形状の中にはシルエット外に投影されないために検出できないものがでてくる。しかし、このような偽形状は物体の内部に存在し、表面には現れないため、物体全体の表面形状を獲得するという目的においては問題とならない。

偽形状を検出するためには、各剛体 s の物体座標系 Σ^{o_s} での非占有空間を求める必要がある。これに対してシルエットから直接的に得られる非占有空間は計測座標系 Σ^e におけるものである。この非占有空間を物体座標系 Σ^{o_s} に変換するためには、シルエットを獲得した時刻における Σ^e から Σ^{o_s} への剛体変換が必要である。つまり、各剛体 s に対する剛体変換が、光切断

法による形状計測と同様に、シルエット観測を行っている間にも得られていれば、各剛体に対する非占有空間を計算することが可能であり、これをもとに偽形状の検出を行うことができる。

3.3 複数運動剛体に対する形状計測手法

以上の議論を踏まえ、光切断法による形状計測の複数運動剛体への拡張を提案する。本手法では、以下の2種類の観測が必要であり、以降ではこの観測を実現する環境、及び観測データの処理する手順について述べる。

[計測対象の形状と運動の計測] 様々な時刻 t において、光切断法によって計測対象(の一部)の表面形状を点群 $p_{t,n}^e$ ($n = 1, \dots, N_t$) として観測する。それと同時に、計測対象を構成する S 個の剛体それぞれに対し、計測座標系 Σ^e から、各剛体 $s = 1, \dots, S$ の座標系 Σ^{o_s} への変換 $W^s(t)$ を観測する。

[非占有空間と運動の計測] 様々な時刻 t' において、計測対象全体のシルエット画像を観測する。それと同時に、先ほどと同様、 Σ^e から Σ^{o_s} への変換 $W^s(t')$ を観測する。

3.3.1 観測環境

ここでは、上記の2種類の観測を行うために必要な観測環境について述べる。

(a) 光切断法による形状計測

計測対象に対してスリットレーザを照射し全体を走査したときの、物体表面での反射光をカメラで観測する。カメラ画像の輝度値に基づいて、反射光の検出を行い、その三次元形状を計算する。形状計測の精度には反射光の検出精度に依存するため、計測対象に照射されたスリットレーザの反射光をくっきりと観測できる環境が望ましい。そのため照明を消した環境で観測を行う。

(b) シルエットの観測

計測対象のシルエットをカメラで観測する。計測対象を撮影した画像(前景画像)に加えて、計測対象だけを取り去った状態での画像(背景画像)を撮影し、これらと比較することでシルエット領域の獲得を行う。シルエットはカメラ画像の各画素で観測された輝度値(色)をもとに獲得するため、計測対象自体が観測できるよう、ある程度明るい環境で観測を行うのが望ましい。そのため照明をつけた環境で観測を行う。

(c) 運動計測

本手法では、光切断法による形状計測とシルエットの観測両方において、計測対象の運動を計測し続ける

必要がある．そのため，運動計測に対して以下の制約があるといえる．

- 形状計測に支障を来さない
- 光切断法を行う照明を消した環境でも，シルエット観測を行う照明をつけた環境でも計測が可能
- 光切断法やシルエット観測と同時刻の運動を獲得

以上の制約を満たした運動計測を実現するため，本手法では紫外線光源と蛍光マーカを用いる．蛍光マーカには薄いシールを用いることができるため，形状計測に支障を来すことはない．先述のとおり，光切断法は照明を消した環境で行うのが適切であるが，紫外線はカメラでほとんど観測されないため，光切断法に対してほとんど悪影響を及ぼさない．これに対し蛍光マーカは，紫外線を吸収し，励起作用によって可視光を放射するため，照明を消した環境でもその位置をカメラで観測することが可能である（図 6(a)）．レーザと異なる色を蛍光マーカに付けておくことで光切断法による計測と区別することができ，光切断法による形状計測と同時にマーカ位置を観測することが可能となる．また，物体と異なる色を付けておけば，照明をつけた環境でもシルエットの観測と同時にマーカ位置を観測することが可能である（図 6(b)）．

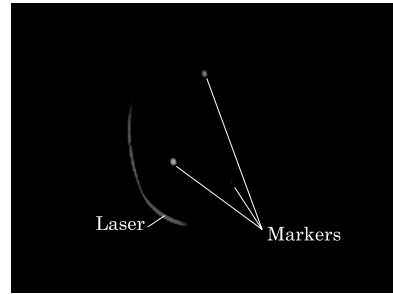
このようなマーカを計測対象を構成する各剛体の表面に 3 点以上貼付し，カメラを用いてその位置を観測する．複数の校正済みカメラを用いれば各時刻における各マーカの三次元位置を計測することができ，その位置変化をもとにして各剛体の剛体変換を推定することができる [1] ．

3.3.2 観測データの処理

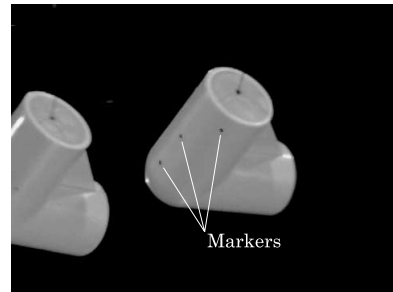
以上の環境で得られた観測データをもとに，各剛体に対してひずみの補正を行い，そこから偽形状の検出と除去を行う．

まず，様々な時刻 t において光切断法で獲得した点群 $p_{t,n}^e$ に対し，各剛体 s の変換 $W^s(t)$ を用いて，物体座標系 Σ^{o_s} における点群 $p_{t,n}^{o_s}$ を獲得する（図 7(a)）．この点群は，剛体 s の実形状と，他の剛体から獲得された点群がもととなって発生した偽形状を含んでいる．

次に，物体座標系 Σ^{o_s} における点群 $p_{t,n}^{o_s}$ に対して偽形状の検出を行う．獲得したすべてのシルエット画像に対し，それから得られる物体座標系 Σ^{o_s} での非占有空間に点群 $p_{t,n}^{o_s}$ が含まれるかどうかを調べる．これは，シルエット画像を獲得した時刻 t' における剛体 s の変換 $W^s(t')$ を用いて，物体座標系 Σ^{o_s} における



(a) In a dark place



(b) In a bright place

図 6 カメラによるマーカ観測

Fig. 6 Marker observation with camera.

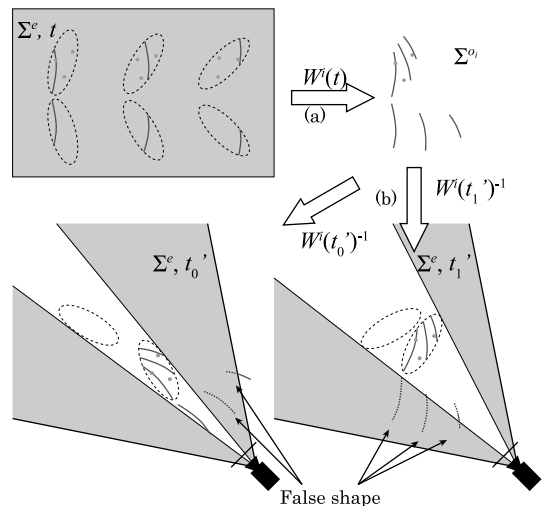


図 7 処理の流れ

Fig. 7 Algorithm.

点群 $p_{t,n}^{o_s}$ をシルエットの計測座標系 Σ^e に変換し，その点群をシルエット画像に投影することによって実現する．シルエット画像に投影する点群を $p_{t,n}^{e,s}(t')$ と表記すると，これは次式のようになる．

$$p_{t,n}^{e,s}(t') = W^s(t')^{-1} p_{t,n}^{o_s}$$

$$= W^s(t')^{-1} W^s(t) p_{t,n}^e \quad (3)$$

獲得したシルエット画像すべてに対して点群 $p_{t,n}^{e,s}(t')$ を計算し、一度でも画像のシルエット外の領域に投影されるような点は偽形状とみなし、点群 $p_{t,n}^{e,s}$ から除外する(図7(b))。

以上の処理によって、各剛体に対して実形状とみなせるものを獲得することができる。

4. 実験

大きさが既知の複数運動剛体を計測し、提案手法の有効性の確認と計測精度の評価を行った。更に実応用例として、手の形状計測を行った。まず、これらの実験を行うために構築した実験環境について述べる。

4.1 実験環境

計測対象に対する光切断法による形状計測、シルエット観測、運動計測を行うための実験環境を構築した(図8)。観測範囲として250mm立方を想定し、周囲に同期撮影が可能なカメラ(Point Grey Research社製 Dragonfly) 32台を観測範囲から約1.2m離して配置した。Zhangの手法[12]及び factorization 法[13]によりカメラの校正を行った。

光切断法に必要なスリットレーザによる走査は、1回当たり約20秒をかけて行い、15fpsのカメラ4台でこれを観測した。スリットレーザが照射された部分を検出し、これに対してステレオを行うことで形状計測を実現した。また、シルエットの観測は照明をつけた状態で32台すべてのカメラを用いて行った。画像からのシルエット抽出は、様々な手法[10],[11]を用いることができるが、本実験ではしきい値処理による簡単な抽出を行い、誤ったところについては手動で修正を

行った。

また、計測対象の運動を計測するため、計測対象を構成する剛体それぞれの表面に四つずつ、大きさ2mmの蛍光マーカを貼付した。このマーカを32台のカメラを用いて観測し、手動で与えられた初期位置と輝度値をもとに追跡を行った[1]。この環境では、0.5mm程度の精度でマーカの三次元位置を計測でき、また運動獲得もおおよそ1.0mm以下の精度で実現できた。

4.2 精度評価実験

計測精度の評価を行うため、半径17mmのL型パイプの形状を計測した。まず、通常的光切断法における計測精度を評価するため、静止させた状態で一つのパイプの形状を計測した。次に、提案手法の計測精度を検証するため、三つのパイプを糸でつるし(図9)、自由運動をする状態でそれぞれの形状を計測した。

それぞれスリットレーザで9回の走査を行い、形状を計測した結果を統合した。また本手法を適用するため、自由運動中の計測対象に対し1秒に1回、全9回のシルエット観測を行った。計測の結果を図10に示す。(a),(b)にそれぞれ、光切断法、シルエット観測で獲得された画像の例を示す。静止させたパイプに対し様々な方向からレーザ走査を行い、形状を計測した結果を(c)に示す。これに対し、(d)は自由運動をする三つのパイプに対して1回のレーザ走査を行い、形状を計測した結果である。三つのパイプから得られた点群が、運動の影響でひずんでしまい原形はとどめていないが、三つのクラスタをなしている。(e)は三つのパイプのうち、一つの剛体変換によって(d)のひずみを補正した結果である。また(f)に、9回分の走査で得られた形状を一つのパイプの剛体変換をもとに補正して統合した形状を示す。(e),(f)は他のパイプを

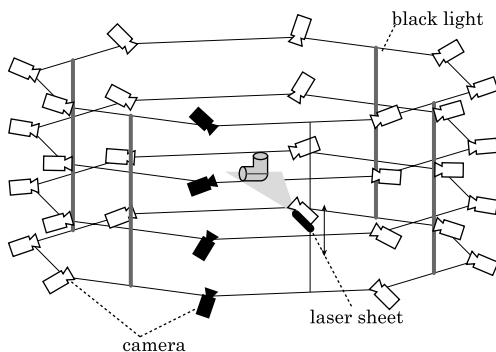


図8 構築した実験装置
Fig. 8 Experimental apparatus.

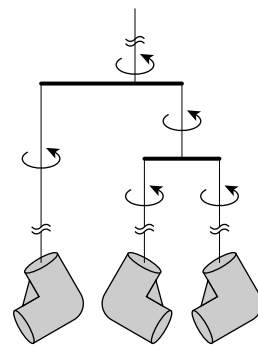


図9 パイプのモビール
Fig. 9 Pipes mobile.

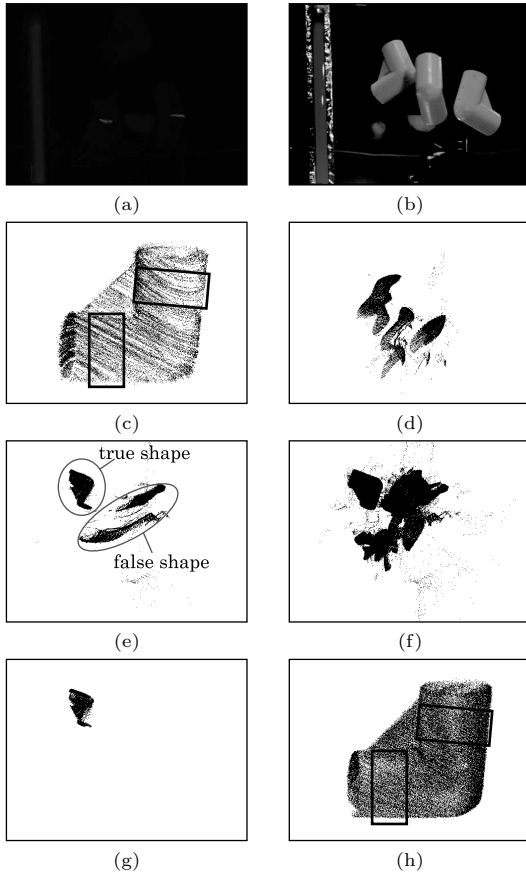


図 10 L型パイプの形状計測
Fig. 10 Shape measurement for the pipe (s).

計測した形状も含まれているため、たくさんの偽形状を含んでいる。提案手法を用いて (e), (f) から偽形状を検出し、それを除去した結果をそれぞれ (g), (h) に示す。偽形状がうまく除去され、補正に用いた剛体変換に対応するパイプの実形状だけが残っているのが図から分かる。また、残り二つのパイプについても同様に、実形状を獲得することができた。

こうして獲得したパイプの形状 (a), (f) を用いて、以下の手順によりパイプの太さを測り、計測精度を評価した。

(1) L型パイプを形状計測して獲得した点群のうち、直管部分 (図 10(c), (h) の枠で囲んだ部分) を取り出す

(2) 点群位置に対して主成分分析を行って直管の軸を推定し、軸と直交する平面に点群を投影する

(3) 平面上に投影した点群から、ハフ変換により

表 1 計測精度の評価
Table 1 Measurement accuracy evaluation.

	平均 (mm)	誤差 (mm)	標準偏差 (mm)
静止剛体	17.14	+0.14	0.20
提案手法	16.55	-0.45	0.25

円の中心を推定し、中心から各点までの距離 (半径) の平均と標準偏差を計算する

以上の手法で評価した結果を表 1 に示す。

静止物体に対する光切断法に比べると若干の精度劣化があったが、提案手法により計測対象が複数運動剛体であってもみずみのない高精度な形状計測が可能であることが示された。精度劣化の原因は次の二つが考えられる。一つは、提案手法で発生する誤差は、通常の光切断法で発生する誤差に加え、各剛体の運動計測で発生する誤差の影響も受けるため、通常の光切断法よりも精度が低下したと考えられる。もう一つの原因は、偽形状の除去による影響である。先述の手法では、位置誤差を直管の断面として得られる円の半径で評価した。通常の光切断法による計測誤差は近似的に、半径 17 mm を中心とした正規分布によってモデル化することができると考えられる。これに対し、本手法では物体外部に分布する点群は偽形状として検出され、除去されるため、誤差分布は半径が小さい方だけの片側正規分布になると考えられる。そのため、本実験では平均誤差が真値よりも小さい方に偏り、平均誤差は大きくなると考えられる。

4.3 手の形状計測

左手を 18 個の剛体からなると仮定し (図 11)、提案手法により形状計測を行った結果を図 12 に示す。様々な姿勢で光切断法による形状計測を数回行い、更に九つの姿勢でシルエットの観測を行った。ある一つの姿勢における形状計測結果を (a) に示す。手を構成する各体節に対し、ある姿勢における物体座標系に形状計測結果を変換した後、獲得したシルエット画像に基づいて偽形状を検出してこれを除去した。本実験で用いたシルエット画像の一部を (f), (h) に示す。その結果を体節ごとに色分けし、(b) に示す。また、(c) に示すように、すべての形状計測結果を統合することで、各体節の全周形状を点群として得ることができた。

各体節の点群に対して球面射影を行い、その球面上で構築したドロネー網に基づいて、各体節の点群に表面を再構成することができる [14]。こうして得られた各体節のパッチモデルを統合することで、手全体の

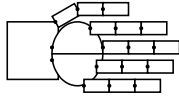


図 11 手の構造

Fig. 11 Skeletal structure of hand.

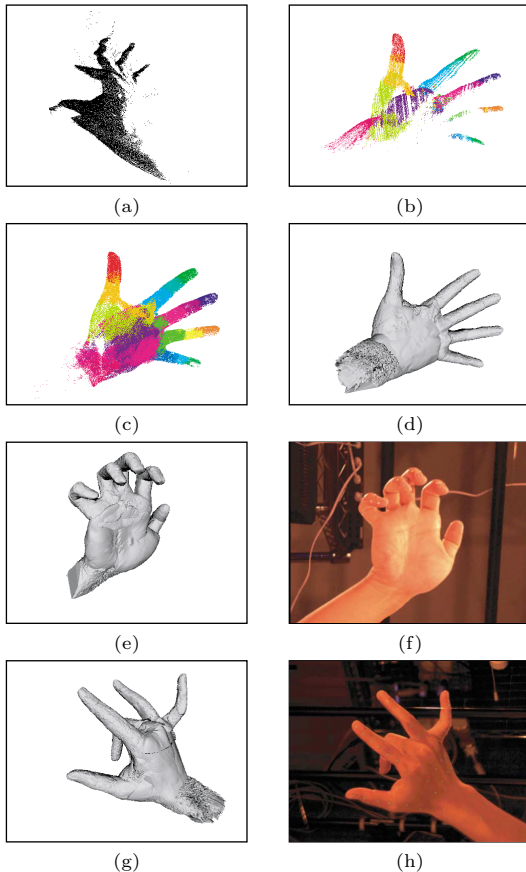


図 12 手の形状計測

Fig. 12 Shape measurement for hand.

パッチモデルを構成したものを (d) に示す．各体節のパッチモデルが得られているため，他の時刻における姿勢に対しても，各体節の剛体変換を用いてその姿勢における手形状を再構成することができた．(e)，(g) に，それぞれシルエットを獲得した姿勢 (f)，(h) における手形状を再構成した結果を例示する．

従来の光切断法で手の形状を計測するためには，手の位置・姿勢を完全に固定させなければならないが，数十秒の間でも生身の手を姿勢を完全に变えず，静止させておくのは困難である [1]．いくら静止させておこうとしても手の位置・姿勢は変化してしまい，これが

原因で計測した形状は図 12 (a) に示したとおりひずむため，正確な形状を計測することは困難であった．この問題に対処するため，これまでは石こうによる型取りを行い，その形状を計測するなどの手法が取られてきたが，これでは様々な姿勢での手形状を計測するのは大きな負担となる．これに対し提案手法を適用すれば，手の位置・姿勢が変化しても，うまく形状計測ができることが示された．また，提案手法では体節ごとの形状が得られるので，関節構造を導入することにより様々な姿勢での形状も表現できると考えられる．

5. むすび

本論文では，光切断法による形状計測を複数運動剛体に拡張し，その際に発生する偽形状をシルエット画像を用いて除去することで実形状を抽出する手法を提案した．複数運動剛体に対する計測実験によって提案手法の有効性を検証し，計測精度の評価を行った．更に，生身の手に対する計測実験を行い，複数姿勢における形状を再構成できるモデルを構築した．

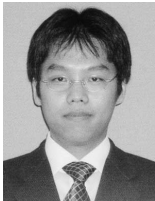
今後の課題としては，複数剛体以外の物体へ光切断法を拡張することが挙げられる．本手法は計測対象を複数剛体と仮定することで，各物体の物体座標系における形状が時間に対して不変であるとし，様々な姿勢における形状の統合を行った．しかし，例えば人の手や身体では筋肉の隆起などによって，物体を構成する各部分が姿勢に応じて変形することがあるが，本手法ではこのような形状変化に対処することができない．これに対処するためには，各物体の物体座標系において様々な姿勢での形状を統合する際に工夫が必要となる．

謝辞 本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の補助による．

文 献

- [1] 船富卓哉，飯山将晃，角所 考，美濃導彦，“身体動揺を考慮した人体部位の形状計測法” 信学論 (D-II)，vol.J88-D-II，no.8，pp.1530-1538，Aug. 2005.
- [2] 山内航一郎，柴田 進，佐藤幸男，“多視点距離画像を用いた人体の三次元形状計測” 信学論 (D-II)，vol.J88-D-II，no.8，pp.1564-1572，Aug. 2005.
- [3] 長谷川一英，廣田祐一郎，小川原光一，倉爪 亮，池内克史，“気球搭載型レーザーレンジセンサ” 信学論 (D-II)，vol.J88-D-II，no.8，pp.1499-1507，Aug. 2005.
- [4] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk “The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues,”

- Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp.131–144, 2000.
- [5] Polhemus 社 FASTSCAN,
<http://www.polhemus.com/fastscan.htm>
- [6] 藤田日出人, 蚊野 浩, 吉田博明, 安田昌司, “2 段階の能動ステレオ画像計測法を用いたハンドヘルド型 3D スキャナ” システム制御情報学会論文誌, vol.15, no.4, pp.213–219, 2002.
- [7] D. Anguelov, D. Koller, H.C. Pang, P. Srinivasan, and S. Thrun, “Recovering articulated object models from 3D range data,” Proc. Uncertainty in Artificial Intelligence Conference (UAI), pp.18–26, 2004.
- [8] 飯山将晃, 角所 考, 美濃導彦, “時系列視体積からの多関節物体の体節形状と姿勢の同時推定法” 信学論 (D), vol.J89-D, no.6, pp.1379–1390, June 2006.
- [9] K. Cheung, S. Baker, and T. Kanade, “Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture,” Proc. CVPR, pp.77–84, 2003.
- [10] 豊浦正広, 飯山将晃, 角所 考, 美濃導彦, “ランダムパターン背景を用いた視体積交差法のためのシルエット欠損修復” 信学論 (D), vol.J89-D, no.11, pp.2413–2424, Nov. 2006.
- [11] 縣 弘樹, 山下 淳, 金子 透, “市松模様の背景を用いたクロマキー” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 2005, pp.400–405, 2006.
- [12] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” Microsoft Research, MSR-TR-98-71, 1998.
- [13] T. Ueshiba and F. Tomita, “A factorization method for projective and Euclidean reconstruction for multiple perspective views via iterative depth estimation,” Proc. European Conf. Computer Vision, vol.1, pp.296–310, 1998.
- [14] 船富卓哉, 毛呂 功, 水田 忍, 美濃導彦, “クラスタリングを用いた人体点群データからの表面再構成” 信学論 (D-II), vol.J87-D-II, no.2, pp.649–660, Feb. 2005.
 (平成 18 年 10 月 6 日受付, 19 年 2 月 8 日再受付)



船富 卓哉 (正員)

平 14 京大・工・情報卒・平 18 日本学術振興会特別研究員 DC・平 19 同大学院情報学研究科博士課程了。同年同大学院情報メディアセンター助教, 現在に至る。三次元モデル, 人体形状計測に関する研究に従事。京都大学博士 (情報学)。ACM

会員。



飯山 将晃 (正員)

平 10 京大・工・情報工卒・平 15 同大学院情報学研究科博士後期研究指導認定退学。同年同大学院情報メディアセンター助手。平 18 年同大学院経済学研究科講師。コンピュータビジョン・三次元データ処理の研究に従事。博士 (情報学), IEEE, 情報処理学会各会員。



角所 考 (正員)

昭 63 名大・工・電気卒・平 5 阪大大学院工学研究科通信工学専攻博士課程了。平 4~6 日本学術振興会特別研究員。平 5~6 スタンフォード大学ロボティクス研究所客員研究員。平 6 大阪大学産業科学研究所助手。平 9 京都大学総合情報メディアセンター助教授, 現在に至る。視覚メディア処理, コミュニケーション, インタラクションに関する研究に従事。博士 (工学)。IEEE, ACM, 情報処理学会, 人工知能学会各会員。



美濃 導彦 (正員)

昭 53 京大・工・情報工卒・昭 58 同大学院博士課程了。同年工学部助手, 昭 62~63 マサチューセッツ州立大学客員研究員, 平元京都大学工学部附属高度情報開発実験施設助教授, 平 7 同教授, 平 9 京都大学総合情報メディアセンター教授, 平 14 京都大学学術情報メディアセンター教授。画像処理, 人工知能, 知的コミュニケーション関係の研究に従事。工博, IEEE, ACM, 情報処理学会, 画像電子学会, 日本ロボット学会各会員。