

球面写像による線分の3次元方位と距離の計測

稲本 康 川上 進 内山 隆 安川裕介 森田俊彦
富士通株式会社

ロボットの視覚技術に関し、球面写像による線分の3次元計測方式を開発した。本方式の特徴は、1眼の運動立体視によって3次元情報を得るところにある。球面写像の基本は、球面上で点を大円に変換する操作である。処理は以下の手順で行う。まず、魚眼レンズを用いた撮像系で球面に投影された画像を球面写像することにより、情景の中から線分を検出する。カメラを並進して得た複数画像についてこの操作を行い、結果を再び球面写像して、線分の3次元方位を計測する。さらに、球面写像を使って線分距離の計測を行う。

本方式のため等立体角射影特性を持つ撮像系を開発し、また新たに開発した較正法によって、撮像系の光軸位置と射影特性の較正を行った。次いで、実画像を用いたシミュレーションを行った結果、線分方位計測精度 3° 、線分距離計測精度5%を得た。さらに、本方式の基本処理である球面写像を実行する専用ハードウェアの試作を行った。並列処理と、写像関数発生方法の工夫により、実用的規模での高速性を目指し、1画面で840msの写像時間を達成した。

MEASUREMENT OF 3-D DIRECTION AND DISTANCE OF LINE SEGMENTS BY SPHERICAL MAPPING

Yasushi INAMOTO, Susumu KAWAKAMI, Takashi UCHIYAMA,
Yusuke YASUKAWA, and Toshihiko MORITA

FUJITSU LIMITED

1015 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki, 211 Japan

A three-dimensional (3-D) measuring method of line segments using spherical mapping has been developed. A distinctive feature of this method is that it obtains 3-D information by the movement of a single camera. The basic process in spherical mapping is a transformation from a point to a great circle. This process is repeatedly applied to detect line segments in the input image, to measure the direction of them, and to measure the distance of them.

A camera having a special projection characteristic which projects the image onto a sphere has been developed along with its calibration method. Simulation study using real images showed the effectiveness of this method with measuring errors of within 3 degrees for line segment directions and within 5% for their distances. A specially designed parallel mapping processor has also been developed. It executes spherical mapping of an image in 840ms.

1. まえがき

原子力発電施設等で点検・補修作業を行うロボットの視覚センサには、機器・配管類が入り組んで配置されているシーンの中から対象物を的確に把握して、3次元的に計測できる機能が要求される。そのためには、(1)広いレンジで、(2)広い視野にわたって、(3)ロボットの動作に見合う精度と速度で3次元計測を行う必要がある。筆者らは、これらの要求を満たす視覚センサ技術として、球面写像法に基づく1眼による運動立体視の研究を行っている。筆者らの運動立体視法は、2眼ステレオに伴う対応点決定問題を避けることができ、また、必要に応じて多数の画像を利用して計測の信頼性を向上できる。まず、立体の基本要素である線分を対象として、シーンからの検出、3次元方位の計測、および距離の計測についてアルゴリズムの検討を行った。また、本方式のため特殊射影特性を持つ撮像系を開発し、その較正法について検討した。次いで、実画像を用いたシミュレーションによって上記アルゴリズムの正当性を確かめた。さらに、本方式の基本処理である球面写像を高速に実行するハードウェアの試作を行った。

2. 球面投影

球面写像においては、通常のカメラのような平面投影でなく、図1のように球面に投影された画像を入力とする。魚眼レンズを用いれば、球面に投影された画像と等価な画像を、平面撮像素子で得ることができる。魚眼レンズにも種々あるが、筆者らは等立体角射影特性レンズを使用することにした。この特性は、入射角 ϕ と像高 y の関係が

$$y = 2f \sin(\phi/2), \quad f: \text{焦点距離} \quad (1)$$

と表され、像の面積が立体角に比例するため、対

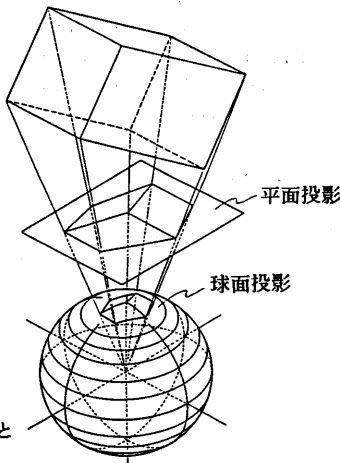


図1. 平面投影と球面投影

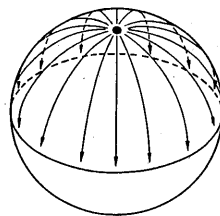


図2. 球面写像の基本操作

象物の見える方向や姿勢によらず一定の分解能で3次元計測ができるという特長がある。

3. 原理

3.1 球面写像

球面写像の基本は、図2のように、球面上の各点について、その点を極とする大円に変換する操作である。球面写像は、Hough変換と同様に、画像空間からパラメータ空間への変換操作の1種であるが、球面の性質に由来する次の特長がある。

- (i) 無限遠点(たとえば平行線の交点)を常に有限の距離で扱えるため、3次元情報の抽出が容易。
- (ii) 類似操作の反復によって、線分検出、線分方位計測、線分距離計測ができるため、ハードウェア化に有利。

このほか、処理の並列化が可能であり、高速処理を実現できるという長所がある。

3.2 線分の検出

球面に投影された画像から、前処理によって抽出した輪郭部分に対して処理を行う。図3において、線分 L の球面への投影 L' を構成する点 P_1' 、 P_2' 、 P_3' 、…について球面写像を行い、大円を球面に書き込んで行くと、大円 ℓ_1 、 ℓ_2 、 ℓ_3 、…は点 S で交わる。そこで、大円のヒストグラムをとれば、点 S でピークになる。したがって、このピークを検出することによって、線分の検出が行える。検出された点 S に対して再び球面写像を行うと、元の線分の投影 L' を含む大円が得られる。

3.3 線分方位の計測

図4のように、カメラを並進させながら線分 L の検出を行い、写像点 S を球面に蓄積してゆくと、それらの点列 S 、 S' 、 S'' 、…は、ある大円上に並ぶ。この点列をさらに写像した大円は、点 SS で交わる。球の中心と点 SS を結ぶベクトル θ は、線分 L の方位ベクトル $L = L' = L'' = \dots$ と一致する。したがって、球面上の点 SS のアドレスから線分 L の方位

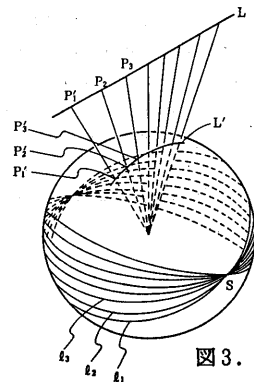


図3. 線分の検出

を知ることができる。

なお、平行線が多い構造物のシーンでは、静止画面においても点SSが生成される。この点SSは、カメラを並進しても不動であり、そのアドレスから平行線群の3次元方位を知ることができる。

3.4 点距離の計測

線分距離の計測に先立ち、点距離の計測について検討した。まず、2次元平面上でカメラCから点Pまでの距離を計測する方法について考える。図5においてカメラを C^0, C^1, C^2, \dots と並進させてゆくと、点Pの見える方向が $S_h^0, S_h^1, S_h^2, \dots$ と変化してゆく。各時点におけるカメラの位置から点Pが見える方向に直線を引くと、これらの直線は1点すなわちPで交わる。そこで、交点Pを求めれば、カメラの最初の位置 C^0 から目的の点Pまでの距離は線分 C^0P の長さで与えられる。

同様の操作を球面上で行う。図6において、右の平面は図5と同じものであり、線分 $O\Sigma$ と垂直に置かれている。また、平面から球面への対応を点線で示している。カメラの移動方向を v とする。カメラを Δx を進めるごとに点Pが P^0, P^1, P^2, \dots と移動して見えたとし、球面へのそれらの投影を $S_h^0, S_h^1, S_h^2, \dots$ とする。点 Σ は、点Pの軌跡を球面に投影した大円の極であり、 $S_h^0, S_h^1, S_h^2, \dots$ を球面写像した大円群の交点として得られる。ベクトル v の端点 v と点 Σ を通る大円の、点 Σ から点 v に至る1/4円周上に時間軸(τ 軸)をとり、点 Σ を $\tau = 0$ すなわち点 C^0 とする。以下、点 C^0 からの弧の長さが、

図4. 線分方位の計測

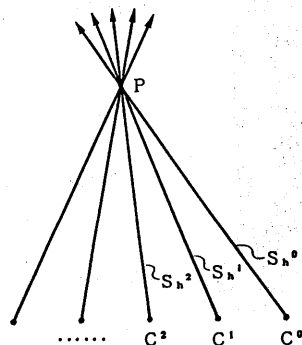


図5. 2次元平面における点距離の計測

$$\tau = \tan^{-1}(i\eta), \quad i=1,2,\dots \quad (2)$$

となる点を C^i とする。ここで、 η は、

$$\eta = \Delta x_0 / R_0. \quad (3)$$

と表されるスケールファクタである。また、 R_0 は距離係数と呼ぶ任意の値である。この手続きは、図6の右の平面上にある C^0, C^1, C^2, \dots の間隔を $1/R_0$ 倍して球面上にプロットすることに相当する。(2)式で $i \rightarrow \infty$ とすればわかるように、点 v は τ 軸の無限遠点である。

次に、平面上の直線が球面上では大円に相当することを考え、 $i=0,1,2,\dots$ について点 C^i と点 S_h^i を大円で結ぶ。これら的大円は、点 C^i と点 S_h^i の外積点の球面写像として得られる。すると、これら的大円は1点すなわちQで交わる。これより、カメラの最初の位置 C^0 から点Pまでの距離は、 $R_0 \tan(\text{弧} C^0Q \text{の長さ})$ で与えられる。

3.5 線分距離の計測

線分距離を、カメラから線分に下ろした垂線の長さとして定義する。計測対象の線分を L とする。図7のように、カメラを Δx を進めるごとに線分 L が L^0, L^1, L^2, \dots に見えたとし、これらを球面上に投影した大円の極である点 S^0, S^1, S^2, \dots と、線分 L の3次元方位を表す点SSを、前述の方法で求める。点SSを極とする大円上で点 S^0, S^1, S^2, \dots と垂直方向に点 $S_h^0, S_h^1, S_h^2, \dots$ をとる。この点列は、各時点でカメラから線分 L に下ろした垂線の足 P^0, P^1, P^2, \dots の球面上への投影である。カメラの移動方向ベクトル v の端点 v と点SSを通る大円と、点列 $S_h^0, S_h^1, S_h^2, \dots$ が並ぶ大円との交点を S_h^∞ とする。点SSから点 S_h^∞ に向かう1/4円周上に τ 軸をとり、点SSを $\tau = 0$ すなわち点 C^0 とする。以下、点 C^0 からの弧の長さが、

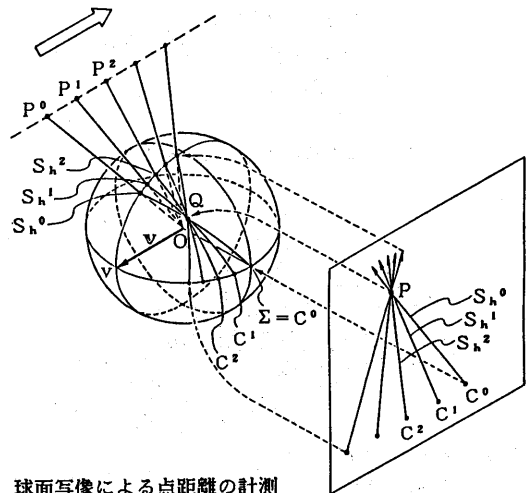


図6. 球面写像による点距離の計測

$$\tau = \tan^{-1}(i\eta \sin r), \quad i=1,2,\dots \quad (4)$$

となる点を C^i とする。 η は(3)式のスケールファクタであり、 r は点 v と点 SS がなす角度である。 $i=0, 1, 2, \dots$ について点 C^i と点 S_h^i を大円で結ぶと、これらの大円は1点すなわち Q で交わる。これより、カメラの最初の位置から線分 L までの距離は、 $R \cdot \tan$ (弧 C^0Q の長さ) で与えられる。ただし、線分 L がカメラの移動方向ベクトル v と同じ平面内にあるときは距離測定ができない。

3.6 カメラの移動方向の計測

点・線分の距離計測では、カメラの移動方向 v を知る必要がある。この情報は他から得てもよいが、以下の方法により、入力画像からカメラの移動方向を計測できる。

複数の点を見ながらカメラを並進させ、これらの点を球面写像すると、図8に示すように点の軌跡に当たる大円の極 $\Sigma, \Sigma', \Sigma'', \dots$ が得られる。これらの極を球面写像して得られる大円の交点 v は、点の軌跡の無限遠点に相当し、球の中心と点 v を結ぶベクトル v はカメラの移動方向ベクトルに一致する。したがって、点 v のアドレスからカメラの移動方向を計測できる。

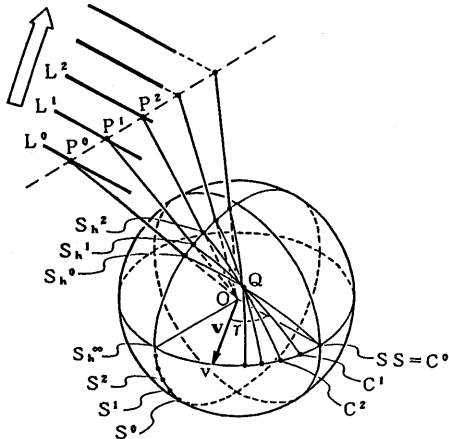


図7. 球面写像による線分距離の計測

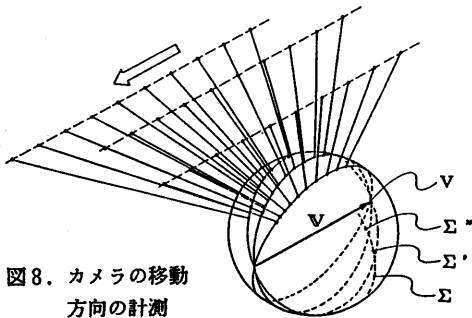


図8. カメラの移動方向の計測

4. 撮像系の較正

本方式に用いる撮像系を、前述の等立体角射影特性レンズと固体撮像素子で構成した。この撮像系による計測精度を高めるため、その光学特性を精密に測定する装置を開発し、較正を行った。

4.1 測定装置

測定項目は、撮像面における光軸位置と射影特性である。図9に測定装置の外観を、図10にその原理を示す。この測定装置は、図10に示した3つの自由度により、基準光線を任意の方向からレンズに入射させる機能を持つ。精度は撮像系(視野 $50 \sim 180^\circ$, 画素数 512×512)の画素分解能の4倍以上である。測定は以下の方法で行う。

(i) 光軸位置: 走査ミラー角を固定してカメラを光軸回りに回転させる。基準光線の結像点が描く円軌跡の中心位置から得る。

(ii) 射影特性: 入射方向と結像位置との対応関係により得る。

4.2 測定結果

視野が異なる3種のレンズを測定して、以下の結果を得た(表1参照)。

(i) 1画素以内の精度で、撮像面における光軸位置を得た。その位置は幾何中心から最大19画素も偏位しており、そのままでは3次元計測精度を大きく劣化させることが判明した。

(ii) 射影特性は、0.3%の精度で理論式(1)と一致

表1. 撮像系の測定結果

レンズ視野 ($^\circ$)	光軸位置の偏位 (画素)	射影特性の偏位 (%)	焦点距離 (画素)
50	10	0.3	580.3
100	19	0.2	294.3
180	9	0.3	180.3

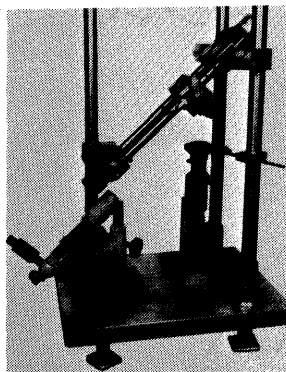


図9. 撮像系較正用測定装置の外観

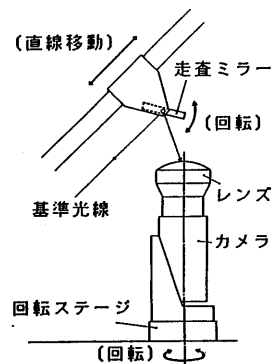


図10. 測定装置の原理

していることを確認した。これは1画素以内の誤差に相当し、実用上全く問題のない値である。(iii)(ii)と同様の精度で焦点距離を較正できることが判った。

5. シミュレーション

前述のアルゴリズムに基づいて線分計測処理をソフトウェアにより実行するシミュレータを開発し、実画像を用いて計測を試みた結果を示す。

5.1 線分計測処理の概要

図11に、カメラを並進しながら得た複数枚の画像を用いて行う線分計測処理の流れを示す。計測は主に球面写像による大円描画と、大円群の集積点抽出との反復よりなる。これを仮想的に球面を表す2次元メモリ上での濃淡処理で実現する。すなわち、大円描画はメモリ上での濃度加算処理で、また集積点抽出はピーク抽出処理で実現する。

5.2 線分計測結果

実験は光学特性の評価・較正を終えた視野100°のカメラで入力した本棚とパイプのシーン(図12)で行い、本棚の輪郭線を計測目標とした。またパイプ(円筒)も、その軸方位は同様の処理で計測できる。画像は、カメラを水平方向に4cmピッチで移動しながら10枚取り込んだ。画素数は256×256である。

(i) 球面投影結果

図13に、球面投影された輪郭画像を示す。これは、輪郭を投影した半球面をレンズの光軸から眺めた様子に相当する。

(ii) 線分検出結果

シーンの中から線分のみを分離するため、投影された各輪郭点を球面写像し、得られる大円群の集積点(S点)を求める。大円累積結果を図14に示す。この結果に対してピーク抽出処理を行い、S点を検出する。検出されたS点を再び球面写像して得られる大円は、元の線分と重なる。ここでは、

その一致度から、線分検出が安定に、かつ十分な精度で行われたことを確認した(図15)。

(iii) 線分方位計測結果

前述のようにS点を再び球面写像すれば、線分を外挿する大円を描くことができる。線分方位計測では、各フレームごとのこれら大円を1つの球面上に累積し、その集積点SSを求める。大円の累積結果は図16のようになり、矢印で示す位置に所望の線分方位を示すSS点がすべて求まった。SS点と球の中心を結ぶベクトルが線分の方位を示す。シーンとの対応は図18のように、 i_0, i_1, i_2 が本棚の持つ3方位、 j_0, j_1 が円筒の軸方位である。特に円筒の軸方位計測は本方式の特徴である。

(iv) 線分距離計測結果

線分距離は各線分方位ごとに、その方位を持つ線分への垂線の足を計測することにより求める。図17は方位 i_0 の場合の結果である。 C^0, C^1, \dots はカメラの移動位置を示す点で、大円は各位置から垂線の足が見えた方向へ引いた直線に相当する。大円の集積点 $Q_0 \sim Q_3$ が垂線の足の位置を与える。その座標から、図18の平面 Ω_0 (カメラの初期位置 C^0 を通り方位 i_0 に垂直な面)上における $Q_0 \sim Q_3$ (各線分と平面 Ω_0 の交点即ち垂線の足)の位置が一意に求まる。すなわち、図17は平面 Ω_0 での断面を球の上で表現したものと考えてよい。したがって、Q点の位置と線分方位とから、各線分を含む直線が3次元空間で一意に定まる。

他の方位 i_1, i_2 についての結果を図19~図22に示す。合計6本の線分が計測できた。大円の集積度が示すように、これらの計測結果の信頼性は高く、シーンが複雑化しても安定な計測が期待できる。

(v) カメラの移動方向測定結果

線分距離計測に必要なカメラの移動方向は、点照明を用いて計測した。図23に、点照明をあてて入力した原画像を示す。この画像と、点照明を当てないで入力した画像(図12)との差をとって点照明の部分だけを分離し、球面投影した結果を図24に示す。カメラを並進しながら入力した全フレームの点照明の部分を球面写像した結果を図25に示す。図の明るい部分に Σ 点が抽出される。 Σ 点をさらに球面写像すると、点照明の移動軌跡が図26のように再生され、図中に矢印で示した位置に v 点が求まった。 v 点の座標から、カメラの移動方向 v は、

$$v(0.0^\circ, 85.8^\circ)$$

と計測できた。実際のカメラの移動方向は、光軸

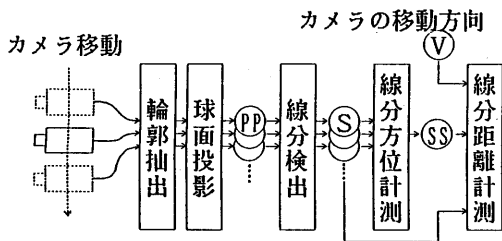


図11. 線分計測処理の流れ

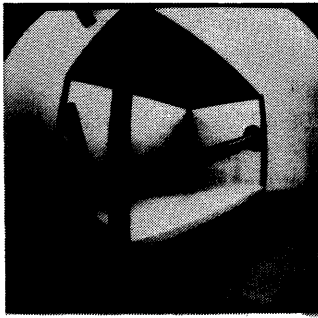


図12. 原画像 (フレーム6)

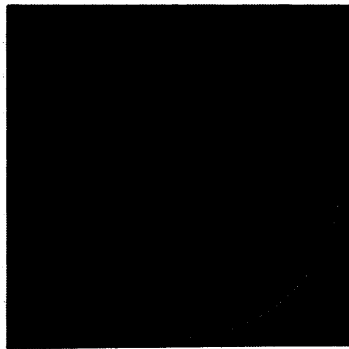


図13. 球面投影した輪郭画像 (フレーム6)

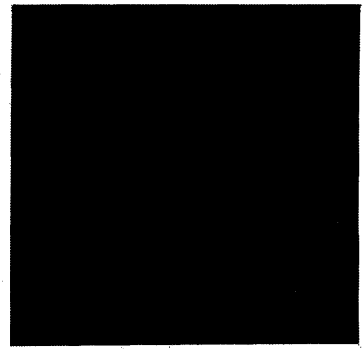


図14. 輪郭点の球面写像結果 (フレーム6)



図15. 線分検出結果 (フレーム6)

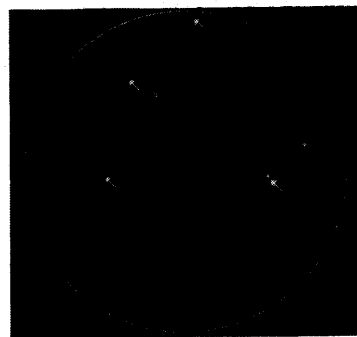


図16. 線分方位計測結果

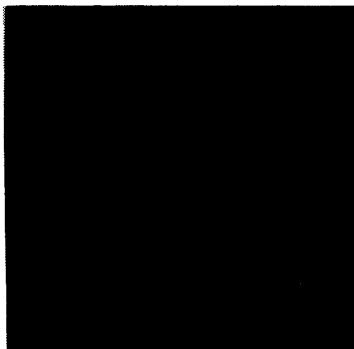


図17. 線分距離計測結果 (方位i-0)

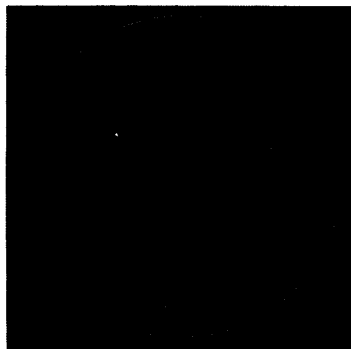


図19. 線分距離計測結果 (方位i-1)

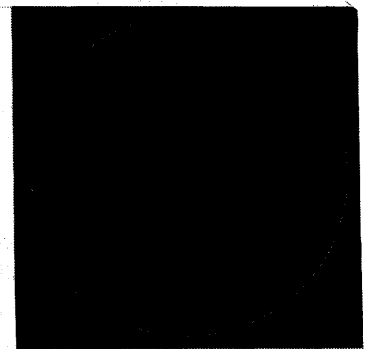


図21. 線分距離計測結果 (方位i-2)

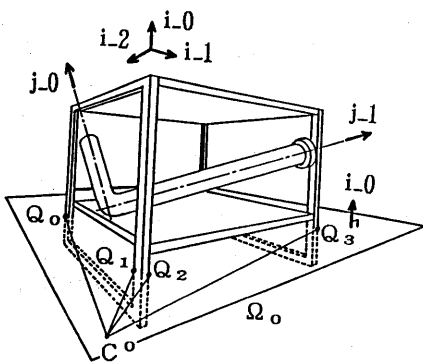


図18. 計測結果と線の対応 (方位i-0)

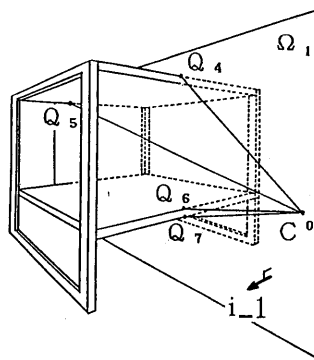


図20. 計測結果と線の対応 (方位i-1)

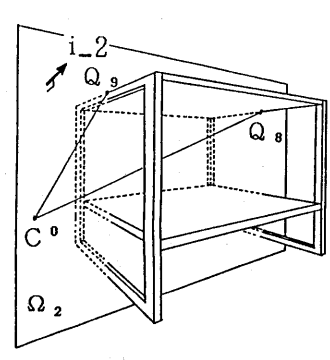


図22. 計測結果と線の対応 (方位i-2)

とほぼ直角でかつ水平であったが、上の結果はこれと一致している。

5.3 評価

今回の実験では、以下の方法によりおよその精度を評価した。まず線分方位については、各方位間の相対角度を調べた(表2)。実際の相対角度が正確に90°であるとすれば、誤差は最大3°である。線分距離についても、計測値から線分間の相対距離を算出し、実測値と比較した(表3)。線分距離の計測誤差は、画素換算でおおよそ±2画素以内であった。ただし、理論的に有する分解能は、線分方位 0.6°、線分距離 2%である。

得られた精度と理論的分解能との間には、まだ隔たりがある。また、遠い線やカメラの移動方向に近い方位の線については、球面上での動きが少なく、計測の安定性および精度ともに低下することが判明した。これを補うには、対象線分の方位や距離によって、戦略的にカメラの移動方向・移動距離等を調整する方法が考えられ、今後の課題である。

6. 並列画像プロセッサ

球面写像を高速に実行する専用ハードウェアを試作した。写像関数発生アルゴリズムの工夫と並

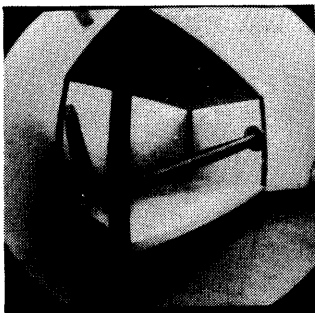


図23. 点照明をあてた画像

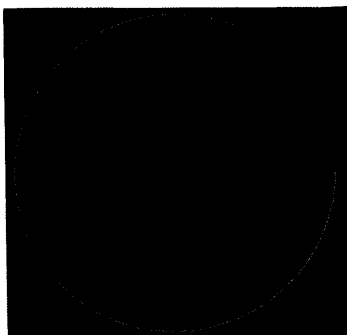


図24. 点照明の球面投影結果

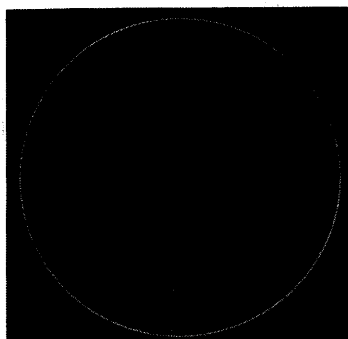


図25. Σ点抽出のための写像結果

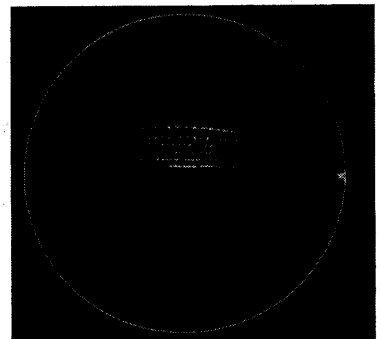


図26. カメラの移動方向計測結果

列処理により高速化を計っている。

6.1 構成

並列画像プロセッサの外観を図27に、また、その構成を図28に示す。本装置は、ホスト計算機のバックエンドプロセッサとして働く。全体で 608 × 1024画素の写像面を、76枚の同一構造をもった写像演算ボードに8ラインずつ分散して搭載し、SIMD方式のマイクロプログラム制御により、写像演算を並列に実行する。写像時間は、10000点の入力(512×512画素の原画像中、輪郭部分を4%と想定)に対して840msであり、ソフトウェア(Sun2)の1000倍以上の速度を達成した。

6.2 写像関数の発生

球面上で点Pを極とする大円Gを描画する場合、計算で大円軌跡を求めることは、三角関数の組み合わせのため時間的に不利である。一方、大円の

表2. 線分方位計測結果と相対角度の評価

方位計測結果 (経度, 緯度)	相対角度の評価		
	項目	計測値	実測値
i_0 (87.4°, 86.8°)	i_0 ~ i_1	89.4°	90°
i_1 (355.3°, 46.9°)	i_1 ~ i_2	93.0°	90°
i_2 (181.1°, 46.3°)	i_2 ~ i_0	90.5°	90°
j_0 (121.9°, 63.3°)	j_0 ~ j_1	92.5°	~90°
j_1 (15.2°, 65.0°)			

表3. 線分距離計測結果と相対距離の評価 (方位i_0 の場合)

垂線の足の計測結果		相対距離の評価		
方位 (経度, 緯度)	距離	項目	計測値	実測値
Q_0 (189.0°, 15.5°)	48.8cm	Q_0 ~ Q_1	60.1cm	61.5cm
Q_1 (352.2°, 31.5°)	25.3cm	Q_2 ~ Q_3	36.4cm	38.1cm
Q_2 (353.0°, 36.2°)	26.8cm	Q_1 ~ Q_2	2.6cm	2.6cm
Q_3 (354.0°, 43.0°)	86.6cm	Q_0 ~ Q_3	73.8cm	74.8cm

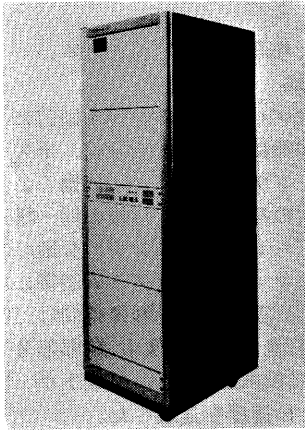


図27. 並列写像プロセッサの外観

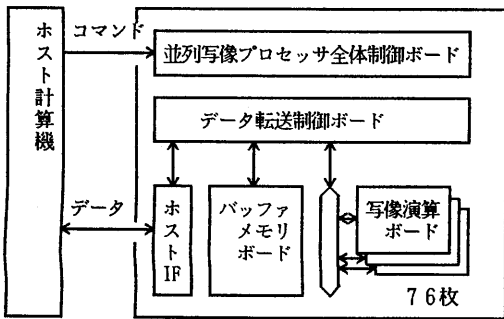


図28. 並列写像プロセッサの構成

軌跡全てをROMに格納しておく方法も、メモリ容量 $O(n^3)$ からみて現実的ではない。ところが、経度 0 の点 P_0 に対する大円 G_0 を基準大円として格納しておけば、 P_0 と同じ緯度の点に対する大円は、 G_0 を回転させて求めることができる(図29)。この方式で必要となるROM容量は(基準大円数 $O(n)$) \times (基準大円の点数 $O(n)$) $= O(n^2)$ となる。またこの回転方式では、緯度ごとに独立に処理が行えるため、図29の点線の如く緯度ごとの並列処理が可能である。このとき単位プロセッサの写像操作は、ROMの読み出しと、回転操作に相当する加算処理に簡約化される。実際の大円の書き込みに当たっては、大円の交点を鋭敏にしてピーク抽出を容易にするために、大円に1画素の幅を付け、さらにその外側に抑制領域を設けた。また写像の高速化のため、幅の端点のみの書き込みを行い、あとで積分により原関数に戻す方式を採用した(図30)。

7. むすび

球面写像による線分の3次元計測について、撮

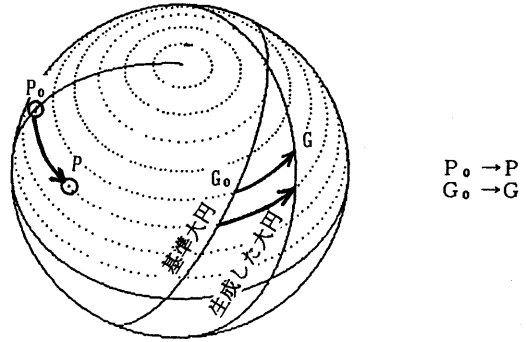


図29. 基準大円の回転による大円の生成

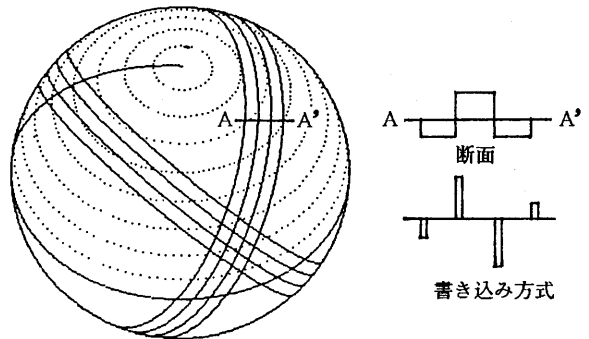


図30. 抑制領域をもつ大円

像系の較正と処理のハードウェア化を含めて、実現性を見通しを得た。今後はさらに、平面・円筒・円などの計測技術を開発して行く予定である。球面写像ハードウェアについては、写像関数(大円)の描画機能ばかりでなく、ピーク抽出機能や距離計測機能についても検討を進めて行く。

なお、本研究は工業技術院大型プロジェクト「極限作業ロボット」の一環として実施したものである。

〔参考文献〕

- (1) 昭和60年度電子通信学会情報・システム部門 全国大会 91
- (2) 同上 96
- (3) 同上 97
- (4) 情報処理学会第33回(昭和61年後期)全国大会 4P-1
- (5) 同上 4P-2
- (6) 同上 4P-3