同軸レーザービームの走査による物体の形状抽出法*

羽 根 一 博** 吉 田 充 伸***

Shape detection by scanning object with coaxial laser beam

Kazuhiro HANE and Mitsunobu YOSHIDA

In this paper, it is demonstrated that object shape is detected easily by scanning with a coaxial laser beam. The coaxial laser beam consists of the He-Ne laser and laser diode beams which are different in diameter. The lights scattered from the object are detected individually through the respective optical filters. The edge position of the object is obtained from the difference between the two light intensities. The image of the object edge is obtained instantaneously only by scanning with the laser beam since the object edge is enhanced in a manner similar to the biological receptive field. The edge enhancement is also explained theoretically.

Key words: laser beam scanner, edge detection, vision sensor, receptive field

1. 結 言

ロボットが環境に適応しながら作業を自律的に行うためには、環境から様々な情報を検出するための各種のセンサが必要になる。視覚に相当するセンサは其中で、作業対象の位置、形などの情報を非接触で取得することができるので、その果たす役割は大きい。視覚センサは、CCDカメラ等を用いて受動的に情報を受け取り画像処理によって認識するコンピュータビジョンと、ロボットのニーズによって限定的な情報をレーザー走査などの方法によって取得するロボットビジョンに大別される。一般にコンピュータビジョンでは、シーン全体の詳細な情報を、個々の物体の集合として再構成することを目的としているために、処理に多大な時間がかかり、複雑な処理アルゴリズムを構築しなくてはならない。ロボットが種々のタスクを遂行するためには、時間をかけて得られるシーン全体の詳細な情報よりも、タスクに必要な情報のみを迅速に把握する大局視¹⁾が必要である。一方興味のある物体に対しては、その部分に対する詳細な情報を得る局所視¹⁾を必要とする。

レーザービームを投影する方法は、スポット光をポリゴンミラーなどにより高速に走査することで、距離画像などの対象物の特定の情報をすばやく取り出すことができる²⁾。またCCDカメラとレーザー走査を組み合わせた効率のよい処理方法として、スリット光を投影する光切断法³⁾⁴⁾や、光学的パターンを投影する方法⁵⁾などがある。

本論文では、波長の異なる2本のレーザービームを照射して物体の形状を読み取るレーザービーム走査型センサを提案する。レーザービームの空間強度分布を工夫することで物体のエッジを抽出する画像処理機能を実現している。これは視覚の低レベルのエッジ検出機能を模倣したものであり、レーザービームを走査するだけで物体のエッジが瞬時に検出できる。また、大局視や局所視を両立させた複合センサへの応用が可能になる。

2. 原 理

動物の視覚系において、網膜上の視細胞からの刺激は神経節

細胞を通り、大脳視覚領へと伝えられる。この過程で1つの神経細胞は、シナプスを介して多数の神経細胞からの入力を受け、入力情報に何らかの処理が加わる。1つの神経細胞に影響を及ぼす網膜上の領域を、受容野(receptive field)と呼ぶ⁶⁾。受容野の性質として、強度がステップ状に変化する領域が結像されたとき、光強度の小さい側の境界はより暗く感じられ、光強度の大きい側の境界はより明るく感じる⁶⁾。これは受容野の空間的な感度が分散の異なる2つのガウス分布の差で近似できることによる。

この受容野の空間感度分布は、同軸の2本のレーザービームを用いて実現できる。本研究で提案する手法においては、2つの異なる波長のレーザービームを同軸に重ねる。図1に測定原理を示す。この同軸ビームを物体に照射し、遠方で物体からの散乱光を2つの検出器で検出する。検出器はそれぞれの波長のみを透過するフィルタを備えている。ビームを走査しながら2つの

Fig.1 Principle for measurement

* 原稿受付 平成8年9月12日

** 正 会 員 東北大学工学部(仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 東北大学大学院

検出器の出力差を得る。

物体に固定された任意の点Pから物体面上の同軸ビームの中心Qへのベクトルを $\vec{p} = (u \ v)^T$ とする。ここで同軸ビームの中心はベクトル $\vec{p}$ によって物体面上を移動するとする。点Qにおける不透明体の散乱を考えると、単位面積から放射される光の強度 $J_0(\vec{p})$ は、

$$J_0(\vec{p}) = [D \cos \theta(\vec{p}) + R \cos^{KP} \beta(\vec{p})] \quad (1)$$

となる⁷⁾。ここで D は物体の拡散係数、 R は鏡面反射係数である。 KP は反射光の広がりを表す定数で16~32の値を取る。 θ はレーザービーム $\vec{L}$ と物体の法線 $\vec{N}$ のなす角、 β は視線方向 $\vec{V}$ とレーザーの入射方向 $\vec{L}$ の二等分線方向と物体の法線 $\vec{N}$ とのなす角である。物体面上で同軸ビームの中心Qからビームで照らされた領域のある点Rへのベクトル $\vec{q} = (x \ y)^T$ を考える。また点Rにおける入射光強度を $I(\vec{q})$ で表す。このとき十分離れた観測点における信号(差信号) $W(\vec{p})$ は、

$$W(\vec{p}) = \iint I(\vec{q}) J_0(\vec{p}) dx dy \quad (2)$$

と求まる。

以下において3つの例を考える。最初の例(モデル1)は、レーザービームの空間強度分布が図2(a)に示すように、ある半径以下の領域で一定である。画像処理のステップフィルタに相当する。このビームの形状をここではステップフィルタ型と呼ぶ。レーザービームに固定された座標の位置 x, y におけるビームの断面強度 $I_1(x, y)$ は、

$$I_1(x, y) = K_1 S(\sqrt{x^2 + y^2}, r_1) - K_2 \left\{ S(\sqrt{x^2 + y^2}, r_2) - S(\sqrt{x^2 + y^2}, r_1) \right\} \quad (3)$$

で与えられる。ここで関数 $S(d, d_0)$ は

$$S(d, d_0) = \begin{cases} 1.0 & (d \leq d_0) \\ 0.0 & (d > d_0) \end{cases} \quad (4)$$

で表される。定数 r_1, r_2 はそれぞれ、内側のアパーチャ径、外側のアパーチャ径を表す。また定数 K_1, K_2 は内側と外側のビームの出力比を決める定数で、一様な拡散反射面(物体面)に対し関数 $W(u, v)$ が零になるように決定する。式(3)の右辺の K_1 の項は図2(a)の正の成分であり、右辺の K_2 の項は負の成分を表す。 K_1 の項と K_2 の項の差は2本のレーザービームの出力差を取ることに対応する。図2(a)のフィルタは画像処理においてよく知られた微分オペレータ(ラプラシアンオペレータ)に相当する⁸⁾。従ってビーム走査により微分処理が行われ、エッジが検出される。

2番目の例(モデル2)は、図2(b)に示すように分散の異なる2つのガウス関数の和として表される場合を考える。レーザービームはガウス分布をしているので、分散の異なる2本のビームを重ねるだけで受容野と同じ空間分布が実現できる。この場合をガウスフィルタ型と呼ぶ。位置 x, y におけるビームの断面強度 $I_2(x, y)$ は、

$$I_2(x, y) = K_1 G(\sqrt{x^2 + y^2}, \sigma_1) - K_2 G(\sqrt{x^2 + y^2}, \sigma_2) \quad (5)$$

で与えられる。ここで定数 σ_1, σ_2 は、それぞれ内側と外側のレーザービーム半径を表す。また関数 $G(r, \sigma)$ はガウスビームの断面強度分布であり、

$$G(r, \sigma) = \frac{2P}{\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{\sigma^2}\right] \quad (6)$$

(a) Step filter type
($K_1=1.0, K_2=0.5$)

(b) Gauss filter type
($K_1=1.0, K_2=6.0$)

(c) Step-gauss filter type ($K_1=1.0, K_2=5.0$)

Fig.2 Three models of laser beam profile

で表される。ここで P はレーザーの出力、 σ はビーム半径を表す。またここではビーム径の2乗は分散と等しいとして扱う。3番目の例(モデル3)は、図2(c)に示すように前述した2つのモデルの積で表される場合である。この例は、ガウスレーザービームの一部を同心円状の開口で透過させた場合に相当する。この場合をステップ・ガウスフィルタ型と呼ぶ。位置 x, y におけるビームの断面強度 $I_3(x, y)$ は、

$$I_3(x, y) = K_1 G(\sqrt{x^2 + y^2}, \sigma_1) S(\sqrt{x^2 + y^2}, r_1) - K_2 G(\sqrt{x^2 + y^2}, \sigma_2) S(\sqrt{x^2 + y^2}, r_2) \quad (7)$$

と表すことができる。図2に $r_1 = 1.0, r_2 = 2.0, \sigma_1 = 0.7, \sigma_2 = 3.0$ (図2(a)におけるアパーチャ内径で規格化されている) の場合のビームの断面強度を示す。

以上の3つの例の同軸レーザービームを用いて、2つの面の境界(稜線エッジ)を走査した場合に得られる信号を式(1)と式(2)を用いて計算により求めた。今回の計算では、レーザービームを走査する代わりに物体をX方向に移動するモデルを考えた。直交する面の稜線エッジ付近を3つのモデルのビームが横切るとき、得られる信号 $W_i(u)$ の計算結果を図3に示す ($i=1, 2, 3$ はそれぞれモデル1, 2, 3に対応する)。ここで $r_1 = 1.5, r_2 = 3.0, \sigma_1 = 1.5, \sigma_2 = 2.5, K_1 = 1.0$ を用いた。また定数 K_2 は一様な反射面に関数 $W_i(u)$ が零になるように決定した。得られた $W_i(u)$ はそれぞれの関数の最大値が1.0になるように規格化した。図中の J_0 は式(1)による。図3に示すように3つのモデルは、ほぼ同じ結果を示した。このセンサは、エッジ近傍で受容野(W_2 に相当)と同様の応答を示す。従って、本手法を用いてエッジが検出できることが分かる。

次に、内側と外側のアパーチャ径が変化した場合に、エッジの検出にどのような影響があるかを調べた。エッジ検出のしやすさの指標としてビームコントラストを用いた。ここでビームコントラストは、出力信号 $W_i(u)$ の最大値と最小値の差とする。また内側と外側のアパーチャ径の比をアパーチャ径比 r_1/r_2 とする。ここで $r_2 = 3.0, \sigma_1 = 1.5, \sigma_2 = 2.5, K_1 = 1.0, K_2$ は一様な物体面上で関数 $W_i(u)$ が零になるように決定し、 r_1 は0.0から3.0まで (r_1/r_2 を0.0から1.0まで) 変化させた。

Fig.3 Signal intensity as a function of object position

ステップフィルタ型はアパーチャ径比が約0.6のときにビームコントラストが最大になり、0.6より大きい場合はビームコントラストに変化は見られなかった。またガウスフィルタ型では、ビームコントラストのアパーチャ径比による変化は見られなかった。ステップ・ガウスフィルタ型はアパーチャ径比が約0.4のときにビームコントラストが最大になり、0.4より大きい場合にはビームコントラストに変化は見られなかった。この結果から通常のレーザービームを用いる場合、最適なアパーチャ径比は約0.5であった。

次に、ビームのビーム径が変化した場合にビームコントラストにどのような変化が見られるか調べた。ここで $r_1 = 1.5$, $r_2 = 3.0$, $\sigma_2 = 2.5$, $K_1 = 1.0$, K_2 は一様な平面上で関数 $W_i(u)$ が零になるように決定し、 σ_1 は0.0から2.5まで変化させた。ガウスフィルタ型とステップ・ガウスフィルタ型の場合、ビームコントラストはほとんど変化しなかった。

3. 実験装置

実験装置を図4に示す。光源にはHe-Neレーザー(波長632.8nm, 出力7.4mW, ビーム径1.5mm)と半導体レーザー(波長676nm, 出力45mWまたは224μW, ビーム径5mm)を用いた。He-Neレーザーはビームエキスパンダ(×5または×10)を用いてビーム径を大きくし、アパーチャを用いてリング状のビーム断面にした。また半導体レーザーは中心部の光が通過するようにした。この2本のビームをビームスプリッタを用いて光軸を一致させて一対のビームを形成し、物体に照射した。今回はビームを走査する代わりに、計測される物体をステージに乗せ、上下・左右に移動した。ビームスプリッタと物体の距離は約40cm, 物体と検出器の距離は約45cm, 検出器とビームスプリッタの距離は約30cmである。

物体から散乱された光を、中心波長が632.8nm(He-Ne)と676nm(LD), 帯域幅がそれぞれ約10nmの干渉フィルタを通し、光電子増倍管(He-Ne: R106, LD: R928)で検出した。検出されたそれぞれの信号をA/Dコンバータで変換し、パーソナルコンピュータ(PC-9821Xa)に取り込んだ。観測された光強度をそれぞれ、単純移動平均法を用いて平滑化し、出力の差を差信号(Difference signal)として取り出した。

4. 結果及び考察

4.1 ビームプロファイル

同軸ビームの断面強度分布の測定結果を図5に示す。ここで半導体レーザーを正の方向、He-Neレーザーを負の方向にとる。内側のアパーチャの径 r_1 は2mm, 外側のアパーチャの径 r_2 は4mmを

Fig.4 Experimental setup

Fig.5 Laser beam profile

用いた。He-Neレーザーのビーム径は15mm, 半導体レーザーのビーム径は5mmである。またそれぞれのビームの強度を一様な平面上で関数 $W(u)$ が零になるように校正し、 $K_1 = 1.0$, $K_2 = 0.7$ とした。中心が強調され周囲が抑制される受容野の特性と同じ特性が得られた。物体の位置がレーザービームを形成するフィルタの位置から離れているため、回折によりステップ変化がなめらかになりガウス分布に近くなった。

4.2 稜線エッジの検出

物体として表面に紙を張った直方体の金属塊を用い、物体の1つの稜線エッジの検出実験を行った。その結果を図6に示す。図中の差信号は物体位置(図中のObject position)が0 mmと55 mmであるとき、He-NeレーザーとLDの出力電圧が等しくなるように係数を掛けオフセットを調節した後、それらの差をとったものである。図6からエッジ付近で特徴的なゼロクロス点が生じる。またエッジから離れた点では出力はほぼ零になっている。

Fig.6 Signal intensity as a function of object position

Fig.7 Measurement signal for triangular sample

これらの結果は図3に示した理論及び受容野の特性とよく一致する。

4.3 濃淡エッジの測定

黒い紙の上に白い三角形(底辺: 6cm, 高さ: 5cm)を描き、ビームを走査することで、色の濃淡による境界(濃淡エッジ)の検出を行った。He-Neレーザのビーム径は15mmである。図7に検出された差信号強度をステージの位置に対して表した結果を示す。測定時間は約30分である。横方向の測定間隔は0.15mm, 縦方向は1mmである。図7より、三角形のエッジが検出されることが確認された。また三角形の頂点では差信号が強調された。この効果は物体の特定の位置を簡単に検出することに役立つ。また図8に図7から得られたエッジ点を理論計算により求めたエッジ像に重ねた図を示す。エッジ点は差信号の変曲点(図6の差信号の最大値と最小値の1/2に対応する物体位置)とした。物体の濃淡エッジが測定値によりよく説明できる。この実験における測定精度は測定値のばらつきの標準偏差を用いて評価すると約0.3mmである。エッジの検出精度はレーザ出力、レーザビーム径などに依存する。レーザ出力を上げ、レーザビーム径を小さくすると検出精度は良くなる。加えてエッジの検出精度は測定値の信号処理方法に依存する。単純なゼロクロス点をエッジ点とする場合は、エッジ点検出精度はレーザビームの走査方向に依存した。本研究では精度の高かった変曲点をエッジ点とする方法を利用した。従って測定精度を向上する解決法として、(1)レーザの出力を向上させる、(2)ビーム径を小さくする、(3)信号のエッジ点検出処理方法を工夫する、などが考えられる。

Fig.8 Measured edge position

Fig.9 Calculated signal for triangular sample

Fig.10 Measurement signal for pyramidal sample

図8の三角形の底辺に測定値と理論値の違い(傾き)があるのは、理論は実験系を簡略化しており、検出器の大きさ、He-Neレーザ光とLDレーザ光の検出器が横方向に離れて配置され同一点にないことを考慮していないためと考えられる。

次に式(2)を用いて理論計算を行い、上に述べた実験結果を確認した。計算に用いた対象物は底辺10mm, 高さ10mm, 黒地に白の三角形である。計算条件は $r_1 = 1.0$, $r_2 = 2.0$, $\sigma_1 = 1.0$, $\sigma_2 = 1.7$ (内径は1.5mmである)を用い、 $K_1 = 1.0$, K_2 は一樣な物体面上で関数 W が零になるように決定した。計算により得られた差信号を図9に示す。計算により求めた結果は図7に示した測定結果をよく説明できる。図9から計算によっても頂点が強調

Fig.11 Measured edge position

されることが分かった。従ってこの効果はこの測定法の特徴である。

4.4 立体の測定

白色の紙で製作した三角すいを白い台紙の上に置き(図11参照), 表面をビームで走査することで, 立体のエッジ検出を試みた。三角すいは, 底面が一边8cmの正三角形, 1つの斜面が一边6cmの二等辺三角形である。He-Neレーザービームのビーム径は7.5mmである。得られた差信号を図10に示す。また図11に図10の信号の変曲点から検出されたエッジ像(黒丸印)と, 理論計算によって求めた信号のエッジの位置(実線)を示す。図10, 11より三角すいの境界と稜線付近でエッジが検出できることが確認できる。右下稜線の測定結果の点数が少ないのは, 稜線を形成する2面からの散乱光強度の差が小さいためにエッジが強調されず, 変曲点がはっきりと現れないためである。図12に三角すいの底面の三角形の底辺に平行な直線(レーザービーム走査線)が他の2辺と交わるときの交点間の距離を, 底辺からの距離に対して示した。結果は直線として表される。最小自乗法で求められる近似直線からの測定値のずれを標準偏差として計算すると約0.3mmであった。

5. 結 言

2波長のレーザービームを用いた物体形状抽出法を提案し, その評価を行った。本手法では網膜の受容野のエッジ検出を模倣した濃淡像及び立体像のエッジ検出が可能であり, エッジの向きに関係なくエッジを検出できることが確認された。さらに物

Fig.12 Line length measured as a function of the height of scanning line

体の頂点が強調される現象が見られた。また, これらの特性を理論的に考察し, 実験とよい一致を得た。

今後, 高速のレーザスキャナと組み合わせ測定時間の短縮を図り, またエッジの向きや距離情報などが測定できるように多機能化を図ることでロボット用のセンサに適用できるよう改善したい。

参 考 文 献

- 1) 奥村 仁, 八木康史, 谷内田正彦: 大局視と局所視の統合による移動ロボットのための複合視覚センサ, 情報処理学会論文誌, 36, 10(1995) 2263.
- 2) M. Rioux: Laser Range Based on Synchronized Scanners: Appl. Opt., 23, 21(1984) 3837.
- 3) 岡田拓史, 秦 清治, 高木裕治: 立体形状の高速認識方式, 精密工学会誌, 52, 6 (1986) 1014.
- 4) 松下俊夫, 佐藤知正, Tapio Heikkilä: ハンドアイシステムのための能動的な視覚計測の計画機能, 日本ロボット学会誌, 10, 2(1992) 235.
- 5) E. Müller: Fast Three-dimensional Form Measurement System, Opt. Eng., 34, 9(1995) 2754.
- 6) 福島邦彦: 生理光学一眼の光学と視覚一, 朝倉書店, (1975) 137.
- 7) T. L. Kunii: Advanced Computer Graphics, Proc. Computer Graphics Tokyo '86, Springer-Verlag, Tokyo, (1986) 111.
- 8) M. D. Levine: Vision in Man and Machine, McGraw-Hill Book Co., (1985) 176.