

動き検出スマート視覚センサ

山田啓一, 曾我峰樹

A Motion Measurement Smart Visual Sensor

Keiichi Yamada, Mineki Soga

要 旨

画像による物体の動き情報検出は、マシンビジョンにおける基本処理の1つであるが、テレビカメラ画像のデジタル画像処理による方法では、大きな処理コストが必要な上、高速な動きの検出が困難である。筆者らは今回、実環境下の物体の動きの方向と速度を高速に検出できる、ロバストでコンパクトかつ低コストな視覚センサの実現技術を開発した。この視覚センサは、1チップのVLSIにより実現されており、新たに考案した動き検出方式により、動きの方向と速度が、高速な動きま

で、広い明るさレンジでロバストに検出できる。この方式により、空間解像度 10×2 の動き検出スマート視覚センサを、最小線幅 $1.5 \mu\text{m}$ の標準的CMOSプロセスにより試作し、その基本性能を評価した。その結果、被写体照度100ルクスから100,000ルクスにおいて、最高100mm/sの像面速度の動きまで、応答時間 $10 \mu\text{s}$ で検出することができた。さらに、屋外道路上の走行車両検出を例に、試作した動き検出スマート視覚センサの有効性を示した。

キーワード マシンビジョン, 動き, オプティカルフロー, スマートセンサ, CMOS VLSI, ビジョンチップ

Abstract

Motion is a fundamental and useful property for machine vision. However, motion measurement by the digital processing of video camera images regains enormous costs. We have developed a technology to realize a compact and low-cost visual sensor which robustly detects the direction and velocity of motion on a focal plane over a wide brightness range at high speed with a newly devised motion detection method. We have developed the prototype of a motion measurement smart visual sensor whose resolution is

10×2 . The sensor is composed of a lens and a single-chip VLSI which was fabricated using a standard 1.5 micron CMOS process. As a result of the performance evaluation, it was confirmed that the prototype sensor can detect motion direction and velocity up to an on-chip image velocity of 100 mm/s with a response time of $10 \mu\text{s}$ under an illuminance range between 200 lux and 100,000 lux. In addition, the effectiveness of the visual sensor was shown during an experiment using actual vehicle detection under outdoor conditions.

Keywords Machine vision, Motion, Optical flow, Smart sensor, CMOS VLSI, Vision chip

1. はじめに

画像による物体の動きベクトルの検出は、マシンビジョンの基本処理の1つであり、より高次の情報を求めるための基ともなる。しかし動きベクトル検出は、テレビカメラ画像のデジタル画像処理による方法では、大きな処理コストが必要な上、テレビカメラのフレームレートの存在により高速な動きの検出が困難である。またマシンビジョンは、既に産業において広く実用化されているが、近年、屋外、家庭、オフィス、第三次産業等へと、応用の場を広げつつある。こういった中で、屋外のような照明条件などが非整備環境下でもロバストに動作するビジョンシステムの要求が高まっている¹⁾。

スマートセンサは、検出器と信号処理回路を同一シリコンチップ上に集積したもの²⁾であり、光検出器と処理回路を一体化したスマート視覚センサ(ビジョンチップ^{3, 4)})は、小型、高速、低消費電力、低コストなビジョンシステムの実現技術として期待される。従来、スマート視覚センサのための動き検出法として、明るさの時間微分と空間微分の関係から検出する方法³⁾、明るさの時間微分(時間エッジ)の相関から検出する方法^{5~9)}空間エッジのゼロクロス点の相関から検出する方法¹⁰⁾などが提案されている。しかしながら、実環境下の物体の動き情報検出に利用するためには、屋外など明るさ変動の大きい環境下でも動きをロバストに検出できる、コンパクトにインプリメント可能な方法が課題となる。

本研究の目的は、実環境下の物体の動き情報の検出ができるスマート視覚センサの開発である。このような視覚センサの実現により、従来のテレビカメラと画像処理によるシステムではコストパフォーマンス的に適用困難であった用途にまで、視覚センサが利用できるようになると期待される。筆者らは今回、動きの方向と速度が広い明るさレンジでロバストに検出でき、かつコンパクトに実装可能な、スマート視覚センサのための動き検出方式を開発した。これは、空間エッジの有無の相関から像の動きの方向を、その移動時間から速度を検出するものである。さらに、この方式による動き検出スマート視覚センサを試作し検証した。

本論文ではまず、新たに考案したスマート視覚センサのための動き検出方式を示し、そのロバスト性を画像処理レベルでの計算機シミュレーションにより検証する。そして、この方式による動き検出スマート視覚センサを試作し、その基本性能を実験により評価する。さらに、屋外道路上の走行車両検出を例に、試作した動き検出スマート視覚センサの有効性を示す。

2. 動きの方向と速度の検出法

2.1 原理

動き検出スマート視覚センサは、Fig. 1に示したように、フォトディテクタと処理回路から成る単位セルがVLSI上に集積された、超並列型の視覚センサである。各単位セルは、フォトディテクタ上に結像された像の1次元の動きベクトル(動きの方向と速度)を検出して出力する。

Fig. 2に考案した動き検出法の原理を、Fig. 3にその単位セルのブロック構成を示す¹¹⁾。この動き検出法は、空間エッジの有無の相関から像の動きの方向を、その移動時間から速度を検出するものである。Fig. 2およびFig. 3において、PD1、PD2およびPD3はフォトディテクタであり、間隔 L で一列に配置されている。 S_1 、 S_2 および S_3 は、各フォトディテクタの出力を示す。 D_1 および D_2 は2値信号であり、それぞれ S_2 と S_1 の比(S_2/S_1)お

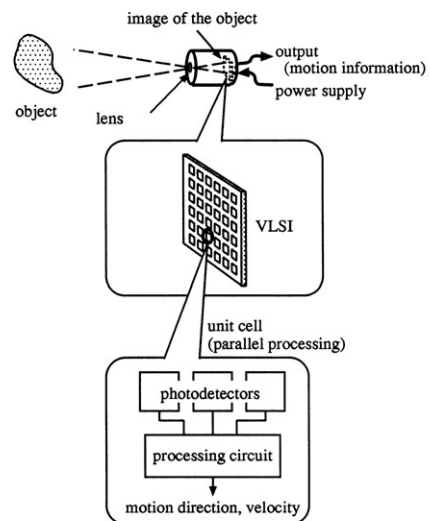


Fig. 1 Motion measurement smart visual sensor.

よび S_3 と S_2 の比(S_3/S_2)を所定の閾値 C で2値化したものである。従って D_1 および D_2 は、それぞれPD1とPD2の間およびPD2とPD3の間に像の濃淡エッジ(空間エッジ)が存在するか否かを表わしている。

いま、Fig. 2(a)に示したように、3個のフォトディテクタ上を像の濃淡エッジが左方向から右方向に移動していくとする。このとき、各信号はFig. 2(b)に示したように推移する。本方式の特徴は、各フォトディテクタの受光領域を接近させて設けることにより、Fig. 2(b)に示すように D_1 と D_2 との間に時間的重なりを持たせるようにすることである。これにより、 D_1 および D_2 が以下の順序で変化したとき、像が右方向に動いたと判定できる。

- (1) D_2 がローレベルのときに D_1 が立上り、
- (2) D_1 が立下がる前に D_2 が立上り、
- (3) D_2 が立下がる前に D_1 が立下がり、
- (4) D_1 が再度立上る前に D_2 が立下がる。

さらに、上記の(3)から(4)までの時間 T は濃淡エッジがフォトディテクタPD2とPD3の間を通過するのに要した時間であることから、フォトディテクタPD2とPD3の間隔 L を時間 T で割ることで、像面上の速度 v が求められる。

同様に、 D_1 および D_2 が以下の順序で変化したときには、像が左方向に動いたと判定される。

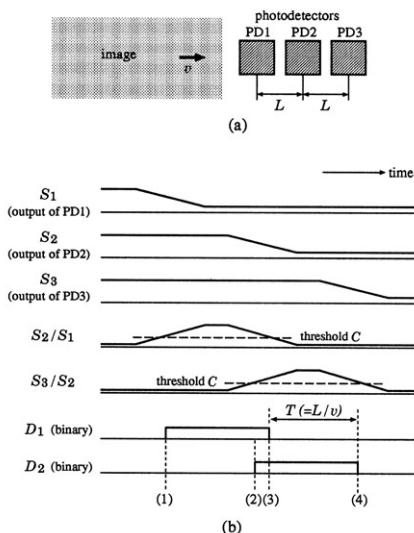


Fig. 2 Proposed method for detecting direction and velocity of motion.

- (1') D_1 がローレベルのときに D_2 が立上り、
- (2') D_2 が立下がる前に D_1 が立上り、
- (3') D_1 が立下がる前に D_2 が立下がり、
- (4') D_2 が再度立上る前に D_1 が立下がる。

さらに、フォトディテクタ間隔 L を(3')から(4')までの時間 T で割ることで、像の速度 v が求められる。

この方式の特長として、検出できる速度レンジが広いこと、検出できる像の明るさレンジが広いこと、処理のためのクロックが不要であること、および動きがロバストに検出できることが挙げられる。本方式は時間に関する定数を含まないで、検出速度レンジは原理的には無限大であり、広い速度レンジの動きが検出できる。また本方式は、フォトディテクタの光電流を、蓄積することなく直接読み出して空間エッジ信号を求めるので、像が明るい場合にも飽和することがなく、広い明るさレンジで像の動きが検出ができる。さらに本方式は、時間軸に対して連続的な処理を行うようにしてインプリメント可能なので、高速な動きまで検出でき、クロック信号が不要であり、消費電力も小さくできる。また本方式は、前述した4つの条件によって動きの方向を判定することにより、動きがロバストに検出できる。

2.2 計算機シミュレーションによる評価

本方式の動き検出のロバスト性を、画像処理レベルでの計算機シミュレーションにより評価した。シミュレーションで用いた画像は、道路上の自動車をテレビカメラで撮像した実画像である。検出したのは、自動車の走行方向に対応した1次

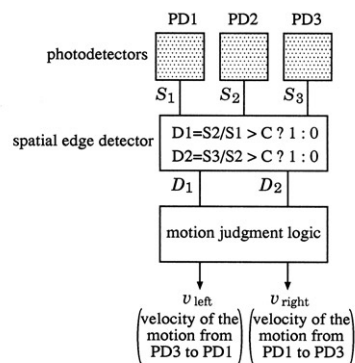


Fig. 3 Composition of a unit cell by the proposed method.

元方向の動きの方向および速度である。対象物の速度は、計算機上で約3桁の範囲で変化させた。

シミュレーションにより得られた結果をFig. 4に示す。同図には、検出方向の正当率および検出方向が正しかった場合における検出速度の精度を、それぞれ真の速度との関係で示す。同図から分かるように、本方式は方向と速度を広い速度レンジでロバストに検出できることが確認された。

3. 動き検出スマート視覚センサの試作

3.1 構成

考案した方式により、動き検出スマート視覚センサを試作した。試作したVLSIチップのレイアウト設計をFig. 5に、そのブロック構成をFig. 6に示す。またFig. 5中には、単位セルのレイアウトも示した。このVLSIの製作には、最小線幅 $1.5\mu\text{m}$ の標準的なシリコンゲートCMOSプロセスを用いた。単位セルの面積は $570\mu\text{m} \times 135\mu\text{m}$ である。フォトディテクタは、p基板/nウェル/p++を利用したフォトトランジスタである。各フォトディテクタの開口サイズは $26\mu\text{m} \times 63\mu\text{m}$ 、間隔 L は $40\mu\text{m}$ である。

単位セルからは、像の左方向および右方向の動きに対応した電圧信号 V_{left} および V_{right} が出力される。 V_{left} および V_{right} は、Fig. 2における時間 T に比例した電圧で、 $V_{\text{left}} = V_0 - i_0 T$ (左方向への動きの場合)、 $V_{\text{right}} = V_0 - i_0 T$ (右方向への動きの場合)である。時間 T はフォトディテクタ間隔 $L \div$ 像面速度 v であるので、 $V_{\text{left}} = V_0 - i_0 L/v$ (左方向への動きの場合)、 $V_{\text{right}} = V_0 - i_0 L/v$ (右方向への動きの

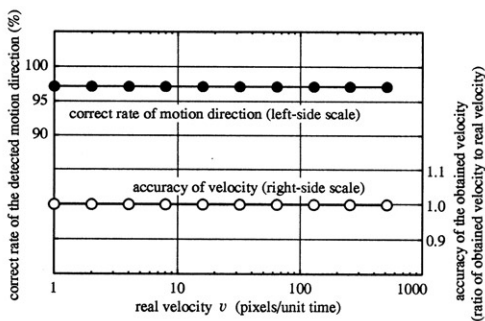


Fig. 4 Evaluation results of the proposed method by computer simulation.

場合)となる。なお、 V_0 は定数、 i_0 はチップ外部からRange信号により設定可能なパラメータである。各単位セルの出力は、Fig. 6に示したように、アドレス信号A0~A4および $V_{\text{left}}/V_{\text{right}}$ 選択信号LRにより選択され、A/D変換器によりデジタル化されてD0~D3に出力される。これにより、各単位セルで検出された動きはスキャン方式によりチップから読み出される。

Fig. 7に、試作した動き検出スマート視覚センサの外観を示す。センサのきょう体は試作品のため大きめであるが、内部には試作VLSI、電池、Range調整VRおよび電源回路(電圧レギュレータ)が入っているのみである。図中のパソコンは、動

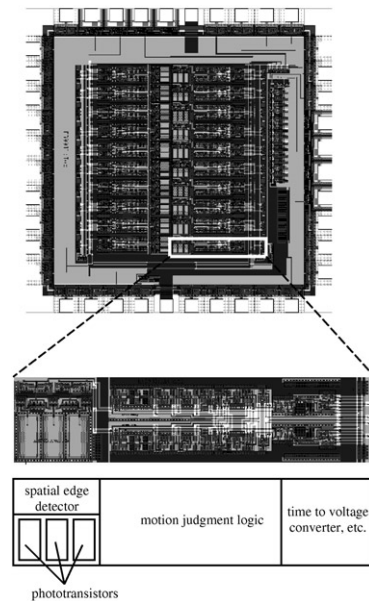


Fig. 5 Layout design of the VLSI chip.

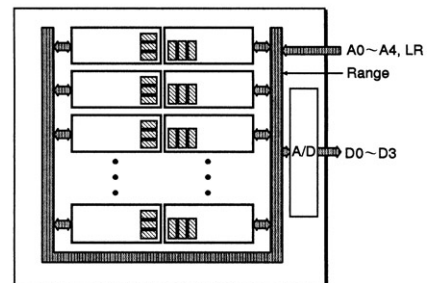


Fig. 6 Block diagram of the VLSI.

き検出結果をセンサから読み出して画面表示するために用いたものである。

3.2 性能

試作した動き検出スマート視覚センサの基本性能を、実験により評価した。コントラストが1対4.8の濃淡エッジの像をチップ表面に結像させ、これを様々な速度で動かして、チップ出力を測定した。**Fig. 8**に、対象物の像面速度とチップ出力との関係を示す。図の横軸は真の速度の逆数を、縦軸はチップ出力電圧 V_{left} と V_{right} の差を示す。同図から、動きの方向が正しく検出され、さらに速度の逆数に比例した出力電圧が得られていることが分かる。その他の実験の結果も含め、試作センサの性能評価結果を**Table 1**にま

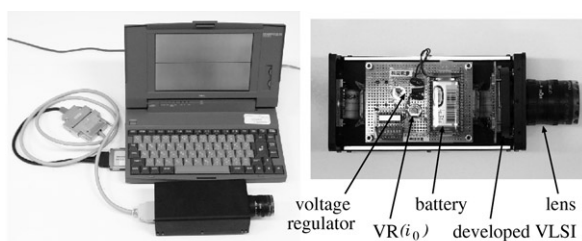


Fig. 7 Prototype of motion measurement smart visual sensor.

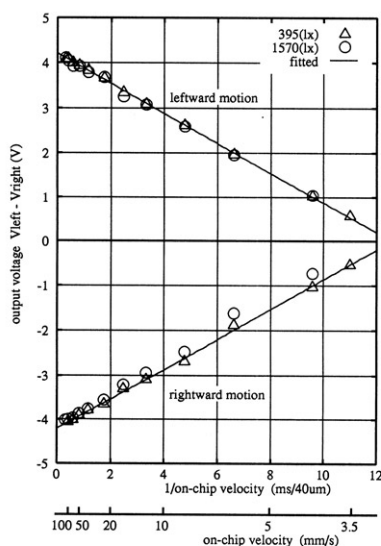


Fig. 8 Characteristic of the prototype sensor.

とめた。

3.3 応用実験

試作した動き検出スマート視覚センサの有効性を確かめるために、屋外道路上の車両の走行方向と速度を、道路上方から検出する実験を行った。**Fig. 9**にその結果の一例を示す。センサの10個の単位セルが約6mの道路幅に対応するように、動き検出スマート視覚センサを設置した。同図左下は、各セルが検出した動きの方向と速度を棒グラフの方向と長さで示してある。同図からも分かるように、路上の走行車両を良好に検出することができた。

Fig. 10は、高速な走行車両に対する応答および、照度変化に対するロバスト性を調べるために、1/10の模型の車を使って行った実験の結果の例である。この実験では、センサの10個の単位セルが車両幅に対応するようにセンサを設置し、車両を100km/h相当の速度で走行させた。センサのレンズは固定絞りである。同図の左側は照度が100,000ルクスの場合の結果を、右側は200ルクスの場合の結果を示す。前者は真夏の日中の日向の照度に、後者は薄暮ごろの照度に相当する。同図からも分かるように、100km/h相当の速度の走行車両も真上から検出することができ、また、照度変化に対するロバスト性も高いことが確認された。

4. おわりに

本稿では、実環境下の物体の動き情報を高速に検出できるコンパクトで低コストな視覚センサの実現を目指して開発した、動き検出スマート視覚センサについて述べた。この視覚センサは、1チ

Table 1 Performance of the sensor.

Response time	10 μ s
Maximum detectable velocity	100mm/s (on chip)
Velocity accuracy	$\pm 20\%$
Brightness dynamic range	100 $\sim$ 100,000 lux (subject illuminance@F1.2)
Number of cells	10 $\times$ 2
Supply voltage	+5V
Power consumption	3.6mW
Chip size	2mm $\times$ 2mm

ップのCMOS VLSIにより実現されており、新たに考案した動き検出方式により、動きの方向と速度が、高速な動きまで、広い明るさレンジでロバストに検出できる。このようなスマート視覚センサの実現により、従来のテレビカメラと画像処理によるシステムではコストパフォーマンス的に適用困難であった用途にも、視覚センサが広く利用できるようになると期待される。動き検出スマート視覚センサは、本稿で述べた路上における車両検出の他にも、建物出入口での人の出入りの監視センサや情報機器のマンマシンインターフェース用センサなど、広範囲な応用が考えられる。今回の試作VLSIは金属層2層の標準的なCMOSプロセスにより製作したが、金属層3層のプロセスを用いて不要入射光を遮光するなど、しかるべき製造プロセスを用いることにより、明るさ感度や検出速度の精度をさらに向上させることができると考えられる。空間的な解像度は、1チップに集積するセル数を増加させることにより向上可能である。今後の課題としては、製造プロセスの改良などによるこれら性能の向上が挙げられる。

参考文献

- 1) 坂上勝彦, 興水大和: "街に出るマシンビジョン", 電気



Fig. 9 A result of vehicle detection on a road with the prototype sensor.

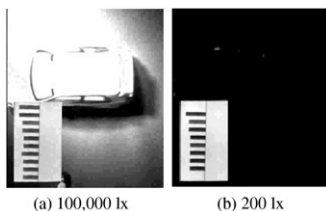


Fig. 10 Robustness against the change of illumination.

学会論文誌C, **117**-10, (1997), 1339

- 2) Middelhoek, S. and Hoogerwerf, A. C. : "Smart Sensors: When and Where ?", Sens. and Actuators, 8(1985), 39
- 3) Mead, C. : Analog VLSI and Neural Syst., (1989), Addison-Wesley
- 4) Vis. Chips: Implementing Vis. Algorithms with Analog VLSI Circuits, Ed. by Koch, C. and Li, H., (1995), IEEE Comput. Soc. Press, California
- 5) Koch, C., Moore, A., Bair, W., Horiuchi, T., Bishofberger, B. and Lazzaro, J. : "Computing Motion Using Analog VLSI Vision Chips: An Experimental Comparison Among Four Approaches", Proc. IEEE Workshop Vis. Motion, (1991), 312
- 6) Horiuchi, T., Lazzaro, J., Moore, A. and Koch, C. : "A Delay-Line Based Motion Detection Chip", Adv. in Neural Inf. Process. Syst., 3(1991), 406
- 7) Kramer, J., Sarpeshkar, R. and Koch, C. : "Pulse-Based Analog VLSI Velocity Sensors", IEEE Trans. Circuits and Syst. II, **44**-2(1997), 86
- 8) Kramer, J. : "Compact Integrated Motion Sensor with Three-Pixel Interaction", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., **18**-4 (1996), 455
- 9) Deutschmann, R. A. and Koch, C. : "Compact Analog VLSI 2-D Velocity Sensor", IEEE Int. Conf. on Intell. Veh., (1998), 359
- 10) Etienne-Cummings, R., J. Van der Spiegel, and Mueller, P. : "A Focal Plane Visual Motion Measurement Sensor", IEEE Trans. Circuits and Syst.-I, **44**-1(1997), 55
- 11) Yamada, K. and Soga, M. : "A Motion Measurement Vision Chip for ITS Applications", Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Image Process., (1999), 28AS1.2

(1999年12月9日原稿受付)

著者紹介



山田啓一 Keiichi Yamada

生年：1961年。

所属：センシング研究室。

分野：ITSのためのマシンビジョンに関する研究開発。

学会等：IEEE，電子情報通信学会，電気学会，映像情報メディア学会会員。工学博士。



曽我峰樹 Mineki Soga

生年：1970年。

所属：センシング研究室。

分野：ITSのためのマシンビジョンに関する研究開発。

学会等：電子情報通信学会会員。