

LI-007

イメージセンサ上の高速動きベクトル検出を用いた撮像系の動き推定

High-Speed Motion Estimation of Imaging Device by using
On-Sensor Motion Vector Detection

中山 賢一† 杉田 俊超† 浜本 隆之†

Kenichi Nakayama Toshiyuki Sugita Takayuki Hamamoto

1. はじめに

現在, 携帯電話などのポータブルな情報通信機器の入力形式としてはキー入力主流である. これに対し, 携帯電話などに内蔵されているカメラ(以降, 撮像系と呼ぶ)を用いて得られた画像から手や腕の動きを認識することで, 文字入力やジェスチャーなどによる直感的な入力を可能とするシステムが検討されている[1].

上述のような画像情報による優れたヒューマンインターフェース(以降, HI と呼ぶ)を実現するには, 高いフレームレートによる動き検出が必要になる. 従来, HI のために高いフレームレートで動作するイメージセンサを用いた入力装置としては, 光学式マウスが代表的である[2]. 光学式マウスでは, ブロックマッチング処理により動き検出を行うことが多いが, センサから対象物体までの距離が近いこともあり, 検出に用いる画素数を十分に少なくし, リアルタイム処理を可能としている.

本研究では, より汎用性の高いHIを実現するために, 高速に動き検出を行う機能を集積したイメージセンサを新たに設計・試作し, センサ内で求めた画素毎の動きベクトルを用いて, 撮像系全体の動きを推定することで, より優れたHIを実現することを目標とする.

本稿では, まず, 本システムに利用する2次元平面内の動きベクトルを検出する機能を有するイメージセンサについて述べる. さらに, このイメージセンサ上で検出した動きベクトルを用いて撮像系全体の動きを推定する方式について述べ, シミュレーションの評価結果について報告する.

2. 2次元動き検出イメージセンサ

2.1 エッジ画素の動き方向検出

我々が設計したイメージセンサでは毎秒1000フレーム以上の高速で動きを検出するため, 以下に示すような1画素単位のフレーム間比較による単純な方式[3]を採用することにした.

各画素の2次元平面内の動きの有無は, 隣接する2つのフレーム間の差分を求めることにより検出する. ここで, 第 k フレームと第 $k+1$ フレームにおける, ある座標 (x,y) の輝度値をそれぞれ $I_{k(x,y)}$, $I_{k+1(x,y)}$ とすると, 図1に示すような, フレーム間の差分値 $d_{(x,y)}$ は次の式により求まる.

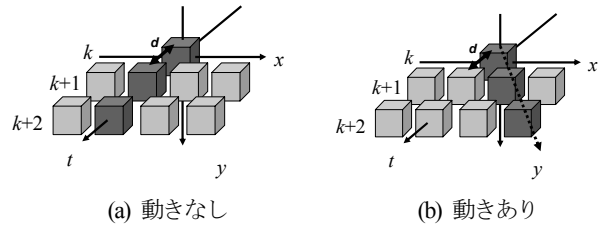


図1 動きの有無の判定

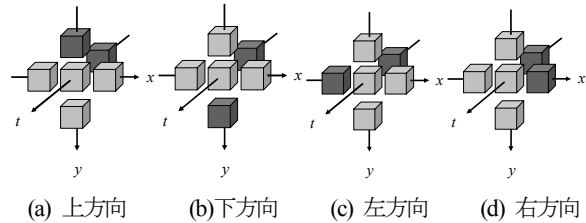


図2 簡易オプティカルフロー検出

$$d_{(x,y)} = |I_{k+1(x,y)} - I_{k(x,y)}| \quad (1)$$

この $d_{(x,y)}$ に適切な閾値 th_d を設け評価することにより, 各画素の動きの有無を検出することができる. しかし, これでは動きの方向や速度を算出できない.

本方式ではフレーム間で, 対象画素と上下左右の各方向に1画素ずらした画素との輝度値の差分を式(2a)~(2d)を用いて算出する. この模式図を図2に示す.

$$m_{up} = |I_{k+1(x,y-1)} - I_{k(x,y)}| \quad (2a)$$

$$m_{down} = |I_{k+1(x,y+1)} - I_{k(x,y)}| \quad (2b)$$

$$m_{left} = |I_{k+1(x-1,y)} - I_{k(x,y)}| \quad (2c)$$

$$m_{right} = |I_{k+1(x+1,y)} - I_{k(x,y)}| \quad (2d)$$

物体がある方向に動いている場合, 移動した方向の画素とのフレーム間の差分値が他の方向との差分値に比べ小さくなる. この際, 事前に縦方向と横方向のエッジ強度をそれぞれ求め, 縦エッジの強度が強ければ式(3a)を, 横エッジの強度が強ければ式(3b)を用いて要素が最小である方向を動き方向として判定する. また, 輝度値の差分値が閾値 th_{edge} 以下である領域に対しては, 動きの方向検出を行わない. 以上により, 動きの有無とその移動方向を判定できる.

† 東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻

$$M_{vertical} = \begin{bmatrix} m_{up} & d & m_{down} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$M_{horizontal} = \begin{bmatrix} m_{left} & d & m_{right} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

2.2 エッジ画素の動き速さ検出

本方式では、式(2a)~(2d)及び式(3a),(3b)により隣接画素内から移動先を判定する。このため、対象物体がフレーム間に1画素以上動いた場合には判定を誤る。また、動き量が1画素に満たない場合は検出されない。つまり、動きの速さに対して最適なフレームレートで撮像する必要があり、検出できる速さとフレームレートの間に相関関係が成り立つ。この相関関係を理論的に説明する。

図3は対象物体の移動と画角中に映り込む物体を示したものである。v[m/s]の速さで移動する対象物体を、f[fps]のフレームレートで撮像する場合、フレーム間における対象物体の動き量v'[m/frame]は式(4)で表される。

$$v' [m / frame] = \frac{v [m / s]}{f [fps]} \quad (4)$$

また、物体の幅がu[m]、物体からイメージセンサまでの距離がr[m]であったとき、画角をθ[rad]とすると、距離rで映し出される範囲は中心からr tan θ[m]となる。取得される画像の幅がw[pixel]、高さがh[pixel]あるとすると、2r tan θがwに相当する。よって、フレーム間の動き量Pは式(5)で表せる。

$$P [pixel / frame] = \frac{v'}{2r \cdot \tan \theta} w \quad (5)$$

このPが1であるとき動きの方向検出が可能となる。また、検出できる動きの速さは式(6)に示すPに1を代入した速さとなる。

$$v [m / s] = \frac{2P \cdot f \cdot r \cdot \tan \theta}{w} \quad (6)$$

本方式では、高フレームレートで撮像し、検出間隔を変える事により、擬似的にフレームレートを多段とする。図4に示すように、まず、動きの方向検出の対象とされたフレームk(以降、基準フレームと呼ぶ)とk+1との比較を行い、ここで検出された画素は撮像したフレームレートに対応する速度で動いていると判定する。検出されなかった画素については、更にk+2, k+3と順次比較を行う(以降、基準フレームと比較されるフレームを参照フレームと呼ぶ)。動きが検出された際の基準フレームと参照フレームの間隔の逆数をとることで、画素の速さに対応するフレームレートが求まる。例えば、検出された参照フレームがk+2であった場合、撮像したフレームレートの1/2に対応する速さで動いていることになる。この擬似フレームレートを式(6)に代入することで動きの速さを算出できる。

ただし、各画素の開口径(フォトダイオード)は点ではなくある大きさの面であるため、実際には正確に1画素の動きでなくとも検出されることが多い。そこで、本方式では0.75~1.25画素移動した場合に1画素移動したと判定されると仮定する。

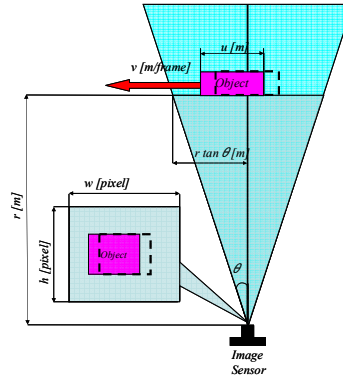


図3 フレームと速さの関係を求めるための模式図

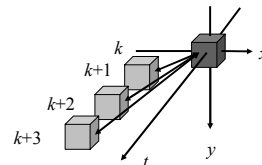


図4 検出処理間隔制御

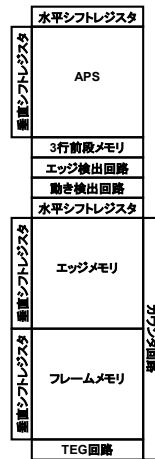


図5 全体ブロック図

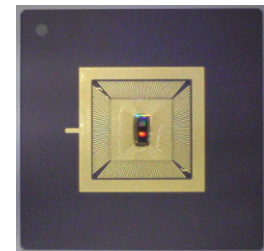


図6 チップの外観

2.3 2次元動き検出イメージセンサの設計と試作

提案方式を実装したプロトタイプチップを試作した。本イメージセンサは図5に示すように主に、APS部、3行前段メモリ部、エッジ検出部、動き検出部、エッジメモリ部、フレームメモリ部、カウンタ部から構成され列並列に処理を行う。試作したプロトタイプチップの設計仕様を表1に、その外観を図6に示す。

まず、APS部から読み出された画素値を3行前段メモリ部にて一時的に保持する。ここで、現フレームが動き検出における基準フレームである場合は、画素値をフレームメモリ部へ書き込む。次に、3行前段メモリ部から、エッジ検出と動き検出に用いる、中央と上下左右の位置の画素値を読み出す。この5値を用いて、エッジ検出部にて水平・垂直方向のエッジ量をそれぞれ求め、各エッジ強度を外側からの閾値電圧と比較し、エッジの有無を判定する。検出された水平・垂直方向のエッジ情報は、それぞれエッジメモリ部へ書き込まれる。参照フレームである場合は、エッジの検出された画素に対して、上記の5値とフレームメモリ部に保

持されている基準フレームの画素値を用いて、動き検出部にてフレーム間差分値を求める。求めた差分値同士を比較してその最小値を求め、検出された動き方向に応じて、フラグ信号を生成し外部へ出力する。動きが検出されなければ、以降のフレームにて同様の検出処理を繰り返す。また、動き検出結果の出力と同時に、カウンタ部にてある領域内で判定された画素の総数を動き方向毎にカウントし、その結果を出力する。

3. 撮像系の動き推定方式

3.1 動きの方向推定

イメージセンサ上で検出した各エッジ画素の動き方向を用いて撮像系全体の動き方向を推定する。イメージセンサからは各画素の動きが上下左右の4方向で出力されるので、この結果を用いて撮像系の動きを斜め方向を含めた8方向で推定する。図7に検出過程を示し、以下にその方法を述べる。

イメージセンサ上で図7(a)に示すように、上下左右方向について各画素の動きが検出されたと仮定する。縦エッジと横エッジの総数が異なるので、撮像系の動き推定の対象となる画素数も上下方向と左右方向で異なる。このため、図7(b), (c)のように上下方向と左右方向を分けて考え、以下のように判定する。

上方向の画素数対下方向の画素数の比率を求め、上方向に比率が偏っていれば上方向、逆であれば下方向と判定する。上下の比率の偏りが閾値 th_{direct} 以下である場合は動きなしとする。左右方向についても同様の処理を行い、左方向、右方向または動きなしと判定する。上下方向及び左右方向ともに動き方向が検出された場合を斜め方向とする。つまり、各画素の動き方向が図7に示すものであった場合、上下方向では下方向、左右方向では右方向と判定され、検出結果は右下方向となる。検出された動きの方向はイメージセンサで取得される画像の流れる方向であるため、撮像系自身の動き方向は逆の左上方向である。

3.2 動きの速さ推定

上下左右4方向に動いていると判定された画素の動きの速さを、それぞれの方向について足し合わせ参照フレーム数で割ることで、動きの速さを簡易的に求める。斜めの場合は上下と左右の両方向の動きの速さをそれぞれ2乗し足し合わせ、その平方根をとったものである。しかし、この求め方ではランダムノイズによる影響で動きの速さを正確に算出できない。そこで、ランダムノイズは上下左右方向で同程度存在すると仮定し、以下に示す方法でより高精度に動き量を求める。

本方式では、擬似フレームレートを用いて、各画素の動きの速さを検出する。ここでは、手や腕を動かす際の最低速度と推定結果の出力間隔を考慮に入れ、8フレームを一組として動き検出を行うこととする。このとき、基準フレームから $N(N < 8)$ フレーム後で動きが検出された画素は、8フレーム後で $8/N$ 画素移動するとみなせ、式(7)により動き量を算出できる。

表1 設計仕様

試作プロセス	2poly, 4metal, CMOS 0.35 μ m
電源電圧[V]	3.3
チップサイズ[mm ²]	1.98×4.48
画素数[pixels]	64×64
画素サイズ[μ m ²]	16×16
開口率[%]	52.8
APS部[Tr./pixel]	3
エッジメモリ部[Tr./pixel, 2bit]	8
フレームメモリ部[Tr./pixel]	4

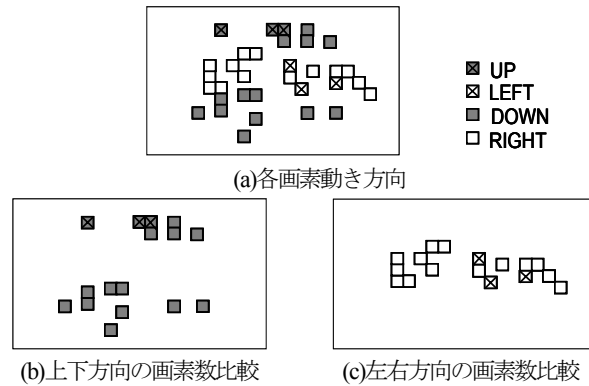


図7 撮像系の動き検出過程

$$P_{direct} = \frac{\sum_{N=1}^8 \frac{8}{N} (N_count_{direct} - N_count_{inverse})}{count_{direct} - count_{inverse}} \quad (7)$$

ここでは、 N フレーム目において動きが検出された画素のうち撮像系の動き方向と同方向の画素の総数を N_count_{direct} とし、逆方向の画素の総数を $N_count_{inverse}$ とする。また、 $count_{direct}$ は N_count_{direct} を全参照フレームについて足し合わせたものであり、 $count_{inverse}$ は $N_count_{inverse}$ に対し同様に求めたものである。

この式により求めた P_{direct} は基準フレームからその後の8フレーム間で移動した画素数であるため、式(6)の P に P_{direct} 、 f に撮像したフレームレート/8を代入し動きの速さを推定する。

3.3 検出可能な撮像系の速度範囲

画像内に動物体が存在しないことを前提とすれば、2.2節で述べたフレームレートと速さの関係をそのまま撮像系の動き推定に用いることができる。式(6)において、 θ と w は撮像系固有の値であり、参照フレームの擬似フレームレートが f 、 P が1であるので、 v が r に比例する。よって、対象物体との距離が離れるほど高い速度まで検出が行える。つまり、対象物体までの距離によりこの方式を用いて検出できる速度が変わるため、画像内の対象物体は距離がほぼ一定である必要がある。

また、0.75~1.25画素の動きが1画素の移動と判定されるという仮定を基に検出可能な速度の範囲を求めると、 P に0.75を代入し求める速度が最低検出速度、1.25を代入し求める速度が最高検出速度である。よって、図8に示すような速度範囲が検出可能である。

4. シミュレーション

1000fps で撮像した実画像を用いて提案方式の性能を評価した。なお、前述した閾値はそれぞれ $th_d=2$, $th_{edge}=16$, $th_{dir}=2$ とした。

4.1 エッジ画素の動き方向検出(センサ内での処理)

2次元平面内の動き方向検出を、図9(a)に示す原画像に対し行った。ここでは、左の物体を右方向へ、右の物体を左方向へ動かした。図9(b)に検出結果を示す。結果画像は、左へ向かっている物体を白色、右へ向かっている物体を黒色、動きが検出されなかった領域を灰色で表示した。この結果により、物体の2次元平面内4方向の動きが良好に検出されることが確認された。

4.2 エッジ画素の動き速さ検出(センサ内での処理)

動きの速さ検出を、図10(a)に示す原画像に対し行った。ここでは左の物体を高速で、右の物体を低速で動かした。基準フレームに対し+1, +2, +4後の参照フレームで対応が取れた画素を白色で表示したものをそれぞれ図10(b)~(d)に示す。この結果により、高速な物体ほど基準フレームに近いフレームで検出されることが確認された。

4.3 撮像系の動き推定(センサ外での処理)

図11(a), (b)に示す対象物体に対してエッジ画素の動きの方向と速さを検出した後、撮像系の動き推定を行った。図11(a)の対象物体は絨毯であり、撮像系で丸を描くように動かした。また、図11(b)の対象物体はビールの缶であり、撮像系でアルファベットの m を描くように動かした。撮像系の軌跡を白色で表示したものを図11(c), (d)に示す。この結果により、撮像系の動きが正しく推定されることが確認された。

5. まとめ及び今後の課題

本稿では、イメージセンサへの実装に適した2次元平面内の動きの方向検出及び速さ検出について述べた。また、これらの検出結果を基に撮像系全体の動きを推定する方式を提案した。さらに、これらの方式を評価するためシミュレーションを行い、撮像系の動きが推定可能であることを確認した。また、本方式を実装したイメージセンサを設計し、その概要について報告した。

今後の課題として、試作チップの評価と試作チップを用いた提案システムの実現が挙げられる。

[参考文献]

- [1] 西田好宏,井上禎之: “モーションセンサ用動きベクトル検出方法の検討”, ITE Technical Report Vol.33, No.33, pp.5~8(2006.6)
- [2] 上山清二: 『Hardware 光学式マウス』
http://www.infonet.co.jp/ueyama/ip/hardware/optical_mouse.html
 (2005.2)
- [3] 吉田崇,杉田俊超,浜本隆之: “オンセンサ3次元物体追跡の処理方式”, 2006 映像情報メディア学会年次大会, 5-5-2, pages(2006.8)

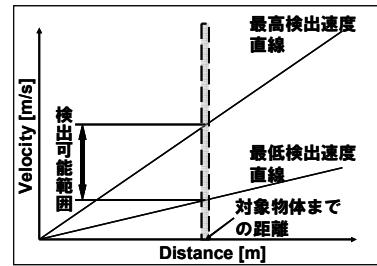
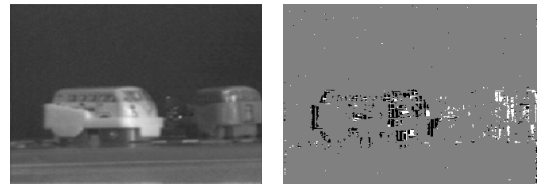
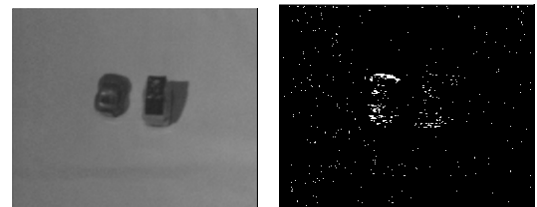


図8 検出可能な速度範囲

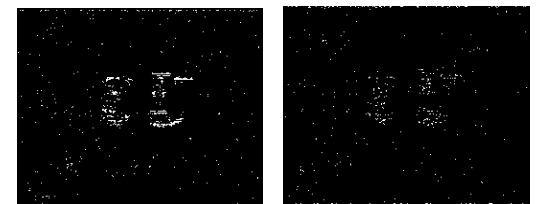


(a) 原画像 (b) 検出結果(水平方向)

図9 エッジ画素の動き方向検出



(a) 原画像 (b) $k+1$ フレームと対応



(c) $k+2$ フレームと対応 (d) $k+4$ フレームと対応

図10 エッジ画素の動き速さ検出



(a)対象物体(絨毯) (b)対象物体(ビールの缶)



(c)丸を描画(絨毯) (d)mを描画(ビールの缶)

図11 撮像系の動き推定