

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 2 日現在

機関番号：15401  
研究種目：基盤研究（B）  
研究期間：2009 ～ 2011  
課題番号：21360198

研究課題名（和文）アクティブアイリスを用いた高速単眼ステレオビジョンの研究  
研究課題名（英文）A Study on High-Speed Monocular Stereo Vision Using Active Iris

研究代表者  
石井 抱（ISHII IDAKU）  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：40282686

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、フレームレートレベルでの高速視点切替を実現するアクティブアイリスに基づく単眼ステレオビジョン理論・アルゴリズムの体系化を行った上で、多視点画像を単一カメラのみで取得可能とした高速アイリス制御機構を高フレームレートビジョンと組合せたプロトタイプ計測システムを構築し、高速運動対象に対する 1000 fps レベルの単眼ステレオ 3 次元計測を実システム上で動作検証し、その有効性を検証した。

## 研究成果の概要（英文）：

In this study, we systemized theories and algorithms for monocular stereo using active iris that can switch viewpoints at high speed. Based on these algorithms, we developed a prototype system that consists of a high-speed active iris mechanism and a high-frame rate vision system, and showed its effectiveness by verifying several 3D measurement results for high-speed moving objects at a frame rate of 1000 fps.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：高速ビジョン・ステレオ計測・アクティブビジョン・時空間素子・  
実時間ビジョン

## 1. 研究開始当初の背景

単眼ステレオ計測の研究として、カメラを能動的に動かすことにより、異なる時刻の多視点画像により 3 次元情報を取得するモーションステレオの研究があるが、多くはカメラを機械的に動かすため、視点位置の切替速度に限界があり、計測対象は静止対象に限定されていた。アイリスに着目した画像処理研究としては、コード化アイリスや構造化瞳

を持つ多重フォーカス距離画像センサ等があるが、これらの研究ではアイリス形状・位置は固定されていた。

研究代表者らは、これまで高速ビジョンの研究開発をハードウェア・ソフトウェア両面から行い、近年では多視点画像に基づく高速 3 次元計測を行うステレオビジョン研究を進めてきた。視点位置の切替法としては a) カメラの高密度配置、b) アクチュエータによる

カメラ位置制御があるが、前者はカメラの物理的大きさによる配置密度限界及び、後者は視点切替速度の機械的限界が問題となる。

このような背景から、本研究におけるアイリス孔位置の微小変位が視点位置の大きな動きを生むことに着目した、視点位置を高速切替制御するアクティブアイリスを考案するに至り、アクティブアイリスと高速ビジョンシステムを組み合わせた新たな単眼ステレオビジョンシステムを提案するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、フレームレートレベルでの高速視点切替を実現するアクティブアイリスに基づく単眼ステレオビジョン理論・アルゴリズムの体系化を行った上で、高速ビジョンハードウェアと高速アイリス制御機構を組合せたプロトタイプ計測システムを構築し、単眼ステレオビジョンによる 1000 fps レベルの 3 次元計測の有効性をシステム上で検証することを目的とした。

具体的には、A) 視点変換アイリスを用いた単眼ステレオビジョンの計測原理・アルゴリズム体系の構築、B) 時空間変調素子を用いた 1000 回/秒の視点変換を可能とするアイリス制御機構の設計・開発、C) 1000 fps レベルの単眼ステレオ計測を可能とする高速ビジョンと高速アイリス制御機構を組合せたアクティブアイリスシステム構築及びその高速ビジョンアルゴリズム実装、D) アクティブアイリスに基づく単眼ステレオ計測アプリケーションに向けた検討 といった形で、大きく分けて 4 つの研究フェーズを進め、1000 fps レベルの実時間高速 3 次元ステレオ計測を実現し、アクティブアイリスの有効性を実システム上で示すことを目的とした。

## 3. 研究の方法

年度毎に以下の研究項目を実施した。

[平成 21 年度] 視点変換アイリスを用いた単眼ステレオビジョンの計測原理の構築

- ・ 視点変換アイリスによる多視点画像に基づく単眼ステレオ計測原理
- ・ 高速回転素子を用いた視点変換アイリスに基づく基本アルゴリズム検証
- ・ 運動対象に対応したビジュアルフィールドバック型視点位置選択アルゴリズム

[平成 22 年度] アクティブアイリスに基づく単眼ステレオビジョンシステムの実現

- ・ 時空間変調素子アイリス制御機構の開発
- ・ 高速アイリス制御機構を用いた高速単眼ステレオビジョンシステムの構築

- ・ 高速ビジョンハードウェアへの単眼ステレオアルゴリズムのハードウェア実装

[平成 23 年度] 高速単眼ステレオビジョンの 3 次元画像計測応用とシステム性能評価

- ・ 特徴点 3 次元追跡に基づくモーションキャプチャシステムへの応用
- ・ アクティブアイリスアルゴリズムの体系化及び応用システム評価

## 4. 研究成果

### 4.1 単眼ステレオビジョン計測原理

アイリス孔位置の高速切替は、図 1 のように異なる視点を持つ仮想的なカメラの配置と等価となる。図 1 のカメラモデルに基づき単眼ステレオ計測は、1) 動画像から対となる左右視点画像の選択、2) 左右視点画像に基づく 3 次元距離の計算 により実現される。

#### 1) 左右視点画像の選択

##### 1-a) 特徴点抽出

輝度勾配に基づく特徴点抽出を行う。本研究では実時間処理の必要性など状況に応じた形で、特徴点抽出を Harris コーナー検出や SURF 特徴量などを使い分けた。

##### 1-b) 特徴点の移動計算

抽出された特徴点の座標平均値に基づき、特徴点の平均移動速度を計算する。

##### 1-c) 左右視点画像の選択

視点切替に伴う特徴点の移動速度は、対象の幾何学的運動による移動に比べ極めて大きい。これを用い、移動速度に基づき視点切替を検出した上で左右視点画像を選択する。

#### 2) 左右視点画像を用いた 3 次元計測

##### 2-a) 正規相関を用いた対応点検索

一般的なステレオ計算法と同様に、左視点画像と右視点画像の正規相関を計算し、その値が最大となる左右対応点を検索する。

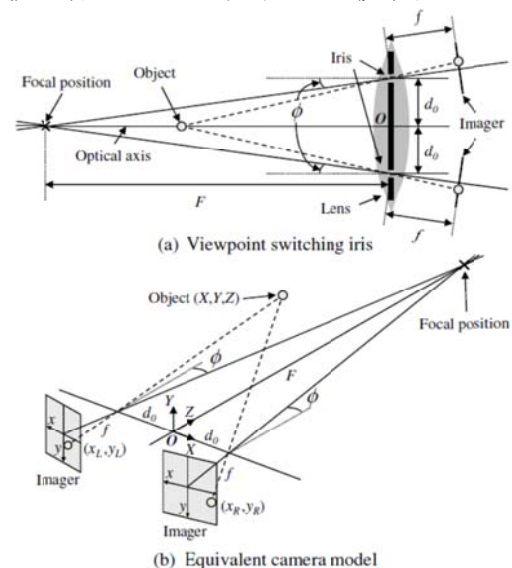


図 1 単眼ステレオビジョン計測原理

## 2-b) 三角測量による三次元距離計算

左右視点画像における対応点対の視差から、三角測量を用いて三次元距離を計算する。

これらの三次元距離計算は、対象の動きが視点切替速度に比べて非常に小さいと仮定したが、実際には対象の運動が高速になると、アイリス切替に伴う同期ずれが無視できなくなり、距離計測誤差に影響を与える。この影響について、アイリス対を結ぶ直線に対し、x 方向(水平)、y 方向(垂直)、z 方向(奥行)に対する対象の運動の数値解析を行い、移動速度による計測誤差には異方性があり、垂直方向に比べ、水平方向の運動は大きく誤差に影響することがわかった。このことは、選択可能な視点数が増えた場合、計測対象の速度方向が検出した上で、誤差が発生しづらい視点対を選択することにより、対象の移動に伴う同期ずれが抑えられることを意味する。

本研究では、上述した左右視点に対する単眼ステレオアルゴリズムを、上下左右4視点に拡張した単眼ステレオ計測の検討も行った。この拡張では、同一視点における特徴点の移動量を検出し、水平運動成分、垂直運動成分の大きさを判別し、水平運動成分が大きい場合は上下視点、垂直運動成分が大きい場合は左右視点を選択した上で、2視点型単眼ステレオアルゴリズムと同様な処理の流れで三次元計測を実現することとした。

## 4.2 アクティブアイリス単眼ステレオシステム

回転スリット板を用いて左右視点を高速切替するアクティブアイリス機構を構築した。図2のようにアイリス孔金属板、円形回転スリット板、プーリー及びモータ(マクソン EC40)から構成される。レンズはモリテックス MTE-55 を切断したものを扱い、切断面にアイリスユニットを挿入した。2つの1.5 mm径のアイリス孔はレンズ光軸から、それぞれ左右方向に6.75 mm離れた位置にある。回転スリット板(直径96 mm)にスリット窓を3つ用意し、60度毎に左右アイリス孔を交互シャッターリングする。スリット板は、プーリーを介し、モータにより100 rpsまで回転する。

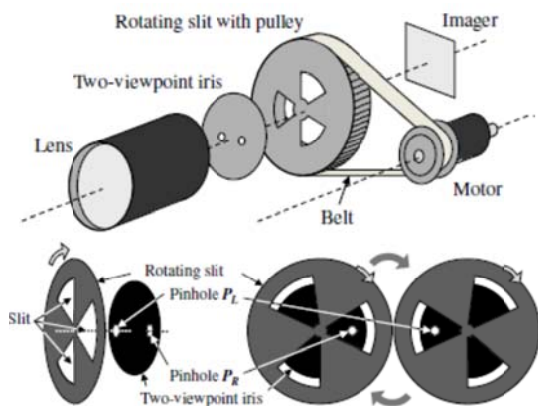


図2 左右視点切替アクティブアイリス機構

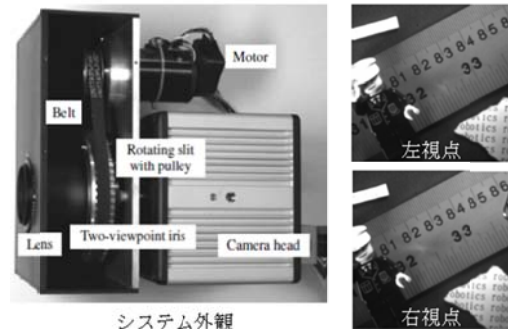


図3 左右視点切替型単眼ステレオシステム

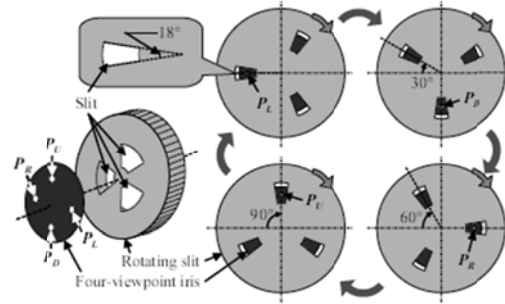


図4 4視点切替型アクティブアイリス

このアクティブアイリス機構を用いた左右視点切替型単眼ステレオシステムの外観を図3左に示す。高速ビデオカメラにはフクロン FASTCAM-1024PCI を用いた。空間解像度  $1024 \times 1024$ 、画素ピッチ  $0.017 \text{ mm}$  の CMOS イメージャにより、10-bit 濃淡画像を  $1000 \text{ fps}$  で撮影可能とし、視点変換アイリスにより秒間  $1000$  回で視点切替される画像が取得できる。図3左にレンズの  $170 \text{ mm}$  前後に配置した計測対象の撮影時において、左右視点が切替った画像を示す。本システムは、イメージャからアイリス面までの距離を  $74.5 \text{ mm}$ 、レンズ焦点面からアイリス面までの距離を  $210.0 \text{ mm}$  とし、それぞれのアイリス孔を介して、実際のレンズ光軸に対して  $\pm 1.84$  度をなすカメラを配置した場合と等価な画像が取得可能とした。これらの取得画像に対し、4.1で記述した単眼ステレオアルゴリズムを施すことにより、三次元計測を可能とした。

上記の左右視点切替型単眼ステレオを拡張し、4ピンホール視点変換アイリスを導入した単眼ステレオシステムの構築も行った。4ピンホール視点変換アイリスの構成を図4に示す。4つのアイリス孔(径  $1.5 \text{ mm}$ )はレンズ光軸からそれぞれ上下左右方向に  $6.75 \text{ mm}$  離れた位置に配置されている。回転スリット板(直径  $96 \text{ mm}$ )では、アイリス孔が同時露光しないように角度  $18$  度のスリット窓を3つ用意し、回転する毎に左右視点対と上下視点対のアイリス孔を交互にシャッターリング可能とした。カメラはフクロン IDP Express を使用し、 $512 \times 512$  画像を  $2000 \text{ fps}$  で取得である。

またプログラブル時空間変調素子である DMD デバイスに基づく視点変換アイリスの構築を試みた。上述システムの光学系を用いた上で、レンズと高速カメラヘッド間に、DMD 制御ボード(TI Discovery 1100)を設置し、DMD デバイスのミラーパターンによりプロ蔵バブルにアイリス形状を設定可能とした。TI Discovery 1100 には  $13.7\mu\text{m}$  四方のミラーが  $1024 \times 768$  個配置された DMD デバイスが搭載され、ミラー ON/OFF 制御を高速に行うことにより、アイリス形状を制御可能とした。アイリスパターン切替は、Vialux ALP-1 ボードにより行い、左右視点に対応したアイリスパターンを 500 fps で切替えた。左右視点画像は  $512 \times 512$  画像として 1000 fps で取得され、後段の処理は前述システムと同じ流れとした。その結果、現状の光学系の設定制限から、合焦点画像を撮影することは困難であったものの、DMD デバイスにより高速視点切替による基本動作を確認し、三次元位置計測が単眼ステレオで実現できることを確認した。

#### 4.3 単眼ステレオによる三次元計測/評価

4.2 で述べたアクティブアイリスに基づく単眼ステレオシステムを用いた三次元計測実験を行い、それらの性能評価を行った。

左右視点型単眼ステレオシステムを用いた実験結果を示す。なお同期処理を安定動作させるために、視点変換アイリスの視点の切替レートを 200 Hz、高速ビデオカメラのフレームレートを 1000 fps に設定した。このとき三次元データ出力レートは 100 fps、左右視点画像の同期ずれは  $1/1000\text{ s}$  である。

静止対象の三次元位置の計測結果を示す。対象には黒い紙上の大きさ  $1.25\text{ mm}$  の白色星形パターンを用いた。パターン面の奥行きを  $140\text{ mm}$  から  $180\text{ mm}$  まで  $5\text{ mm}$  間隔で準静的に動かした場合、計測された奥行きと実際の値の関係を図 5 に示す。対象が静止時には、計測値と実際の奥行きがほぼ一致した。

次に前述した星形パターンの移動速度が三次元計測にどのような影響を与えるかを検証した。x 軸, y 軸, z 軸方向に対し、速度  $-100\text{ mm/s}$  から  $100\text{ mm/s}$  まで  $10\text{ mm/s}$  刻みで、リニアステージにより計測対象を、座標  $(0, 0, 170\text{ mm})$  の点上を移動させた場合、その点通過時に計測された奥行きと実際の値を比較したグラフを図 6 に示す。比較のために、左右視点画像の同期ずれを  $1/30\text{ s}$  とした場合の実測値、同期ずれを考慮した上でカメラモデルに基づき計算される奥行きの値を示した。x 軸方向の移動が奥行き計測に大きな誤差要因となり、同期ずれの時間に比例して誤差が増加した。y 軸方向の移動に対しては、大きな誤差が見られない一方で、同期ずれにより計測不能となる場合があった。これは、左視点と右視点画像の対応点の y 座標の差が大きい場合探索不能となるためである。

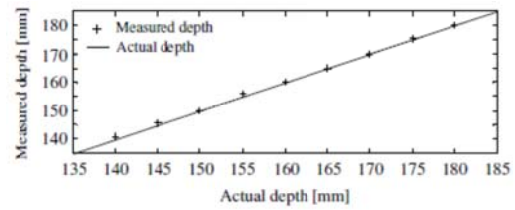


図 5 静止対象に対するデプス計測結果

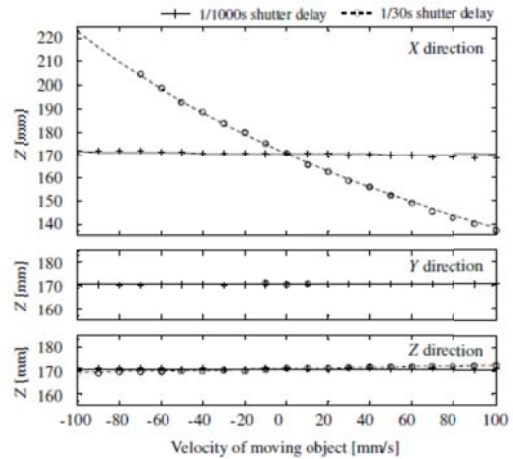


図 6 運動対象に対する計測誤差

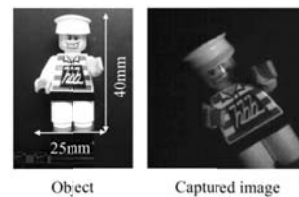


図 7 実時間ステレオ計測実験に用いた対象

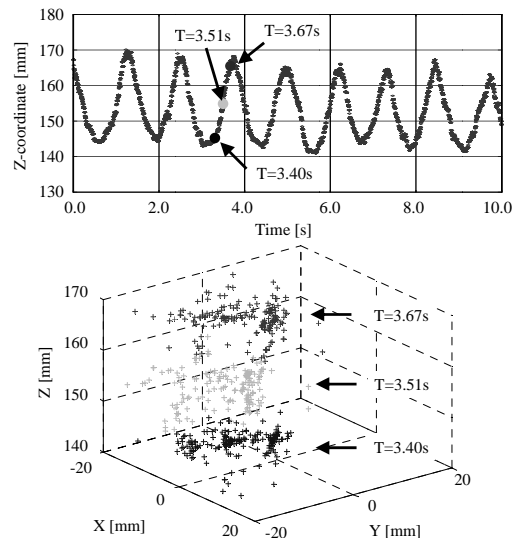


図 8 実時間ステレオ実験の計測結果

また左右視点型単眼ステレオシステムに対応した形で、 $1024 \times 1024$  画像に対して KLT (Kanade-Lucas-Tracker) と同レベルの特徴点追跡を 1000 fps 動作可能とする高速ビジョンハードウェアの開発を行った。その結果 200 Hz の左右視点変換レートに対応した形で、

実時間で単眼ステレオ計測が動作することを確認した。図7で示す25 mm×40 mmの人形を1.5秒程度の周期で奥行方向に前後した場合の実時間計測結果を図8に示す。

次に4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測実験を行った。視点変換アイリスの視点切替レートを400 Hz、高速ビデオカメラフレームレートを2000 fpsに設定した。三次元データレートは100 fps、使用する視点画像の同期ずれは1/200 sである。

直径2 mmの白色リングパターンを回転運動させた場合について、三次元座標の時間変化を計測した。レンズ光軸に対し35度傾けた面において、回転半径2 mmで対象を3 Hzで回転させた。図9に計測結果を示す。左右視点画像(左右視点変換型単眼ステレオと等価)のみを使用した三次元計測結果も示した。図10にX, Y方向の速度とZ座標値の計測誤差の時間変化を示す。左右視点画像のみではX軸方向の速度、上下視点画像のみではY軸方向の速度に対応して誤差が大きくなる。一方で4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオでは、より計測誤差の少ない結果を自動選択していることがわかる。

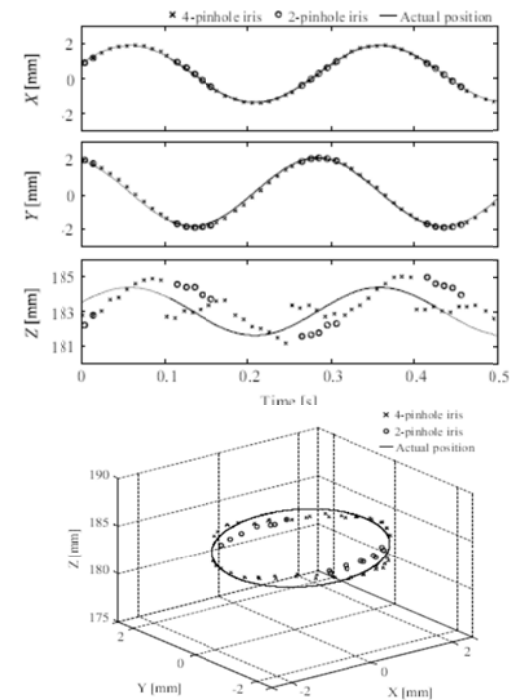


図9 回転対象に対する三次元計測結果

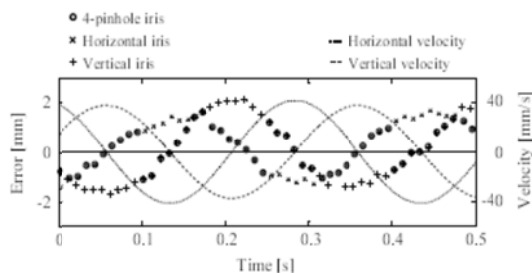


図10 回転対象に対する計測誤差

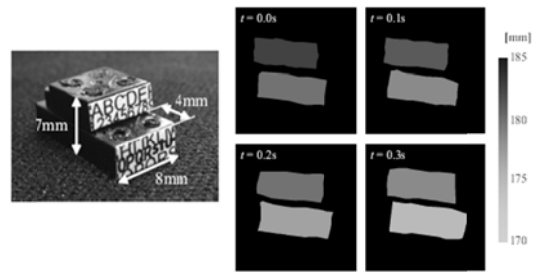


図11 運動対象の三次元形状計測

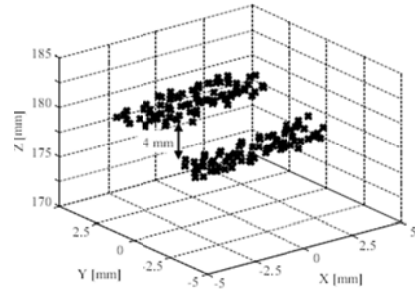


図12 運動対象の三次元形状計測結果

最後に運動対象の三次元形状を動画像として取得した例を示す。計測対象は図11左のように、段差4mmとなる階段形状を持つ大きさ7×8mmの対象を用いた。実験では、対象を1秒間の間に20 mm奥行き方向手前に動かした場合の三次元距離画像を取得した。取得した三次元画像の様子を0.1秒間隔の画像列として図11右、t=0sで計測された三次元形状を図12に示す。これらの図から、計測対象にある4 mmの段差が計測され、かつ奥行き方向の動きに対応して、三次元形状が画像情報として計測できることを確認した。

このように本研究では、視点変換アイリスと高速ビデオカメラの組み合わせにより、秒間1000回の左右視点切替を可能とする単眼ステレオシステムを構築した。実際に運動対象に対する計測実験を通じて、構築したシステムの性能評価を行い、高速な視点変換により、同期ずれによる計測誤差などが抑えられ、運動対象に対応した形での単眼ステレオ三次元計測が実現できることを確認した。またアルゴリズムの高速リアルタイム実装についてもその基本動作を確認している。

今後は、本研究で具現化した単眼ステレオシステムが利点を持つ、物理的にカメラの複数台配置が難しい場面のアプリケーション展開を念頭にし、例えば、顕微鏡等の微小光学系に対応したシステムの小型化に対する検討が大きな課題として考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. Q.Gu, T.Takaki and I.Ishii, A Fast Multi-Object Extraction Algorithm Based on Cell-Based Connected Components Labeling, IEICE Trans. Information and Systems, Vol. E95-D No. 2, 査読有, 2011, pp. 636-645.
  2. Y.Wang, I.Ishii, T.Takaki and K.Tajima, An Intelligent High-Frame-Rate Video Logging System for Abnormal Behavior Analysis, 査読有, Vol. 23, J. Robotics Mechatronics, 2011, pp.53-65.
  3. 森上雄太, 高木健, 石井抱, 視点変換アイリス機構に基づく単眼ステレオシステム, 日本機械学会論文集(C編), Vol.76, 査読有, 2010, pp.232-239
  4. 石井抱, 谷口拓, 山本健吉, 高木健, 高速実時間オプティカルフローシステム, 電子情報通信学会論文誌, J93-D, No.1, 査読有, 2010, pp.29-38.
- [学会発表] (計 12 件)
1. I.Ishii, I.Ohara, T.Tatebe and T.Takaki, 1000-fps Target Tracking Using Vibration-based Image Features, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 10 May 2011, Shanghai, China.
  2. I. Ishii, Y.Wang and T.Takaki, Visual Machinery Surveillance for High-Speed Periodic Operations, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 27 September 2011, San Francisco U.S.A.
  3. Q.Gu, T.Takaki and I.Ishii, 2000-fps Multi-Object Recognition Using Shift-Invariant Features, Int. Symp. on Optomechatronic Technologies, 3 November 2011, Hong-Kong China.
  4. L.Chen, H.Yang, T.Takaki and I.Ishii, Real-Time Frame-Straddling-Based Optical Flow Detection, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 10 December 2011, Phuket Thailand.
  5. 石井抱, 顧慶毅, 建部哲郎, 森上雄太, 高木健, 田嶋健司, 高フレームレート映像記録機能を有する高速ビジョン, 第 15 回ロボティクスシンポジウム, 2010 年 3 月 15 日, 奈良県吉野郡吉野町
  6. I.Ishii, T.Tatebe, Q.Gu, Y.Moriue, T.Takaki and K.Tajima, 2000 fps Real-Time Vision System with High-Frame-Rate Video Recording, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 4 May 2010, Anchorage U.S.A.
  7. I.Ishii, Y.Wang and T.Takaki, An Intelligent High-Frame-Rate Video Logging System with Real-Time Image Processing at 1000 fps, IEEE Int. Conf. on Multimedia & Expo, 21 July 2010, Singapore Singapore.
  8. Y.Moriue, T.Takaki, K.Yamamoto and I.Ishii, Momocular Stereo Image Processing Using Viewpoint Switching Iris, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 15 May 2009, Kobe Japan.
  9. 建部哲郎, 森上雄太, 高木健, 石井抱, 田嶋健司, 高フレームレート動画記録機能を有する高速アクティブビジョン, ロボティクスメカトロニクス講演会 2009, 2009 年 5 月 25 日, 福岡市
  10. 森上雄太, 高木健, 石井抱, 視点変換アイリスによる実時間単眼ステレオシステム, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 17 日, 横浜市
  11. I.Ishii, T.Taniguchi, R.Sukenobe and K.Yamamoto, Development of High-Speed and Real-Time Vision Platform, H3 Vision, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 13 October 2009, St. Louis U.S.A.
  12. I.Ishii, R.Sukenobe, Y.Moriue and K.Yamamoto, Real-Time Feature Point Tracking at 1000 fps, IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 18 December 2009, Daejeon Korea.
- [その他]
- ・ 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH 表彰 (受賞者: 森上雄太(研究代表者の指導学生), 高木健, 石井抱, H22.6.15)
  - ・ IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (受賞者: 森上雄太(研究代表者の指導学生), H21.5.15)
  - ・ 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 若手奨励賞 (受賞者: 森上雄太(研究代表者の指導学生), H21.12.25)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
石井 抱 (ISHII IDAKU)  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 4 0 2 8 2 6 8 6
  - (2) 研究分担者  
高木 健 (TAKAKI TAKESHI)  
広島大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 8 0 4 5 2 6 0 5
  - (3) 連携研究者  
なし