

太陽光下で利用可能な 投影式2眼立体視システムの研究

Projected Texture Stereo Vision System in Sunlight

青山 千秋*
Chiaki AOYAMA

要 旨

太陽光下においても模様のない床面までの相対距離を、非接触でリアルタイムに計測できる2眼立体視カメラシステムを開発した。模様を投影した画像と投影していないときの画像を高速で交互に何枚も撮影し、それぞれの画像を画素内で積分し、画素外で差分するカメラを開発した。パルス発光による目に対して安全な Class 1 模様投影器とこのカメラを組み合わせることにより、10万 lx の太陽光下でも反射率が5%以上あれば、対象の表面が無地であっても距離を計測でき、0.9 m から 1.5 m の範囲で 1 mm の距離精度を達成した。

ABSTRACT

A binocular stereo vision camera system able to measure relative distance to a non-textured floor in real time without contact even under direct sunlight has been developed. A camera that alternately captures images with and without a projected texture at high speed, integrates the respective images within the pixels, and outputs the difference between them outside the pixels was developed for the system. The combination of this camera and a texture projector using a Class 1 laser that is safe for the eyes for pulse light emission has made it possible to measure the distance to a subject with a non-textured surface even under sunlight of 100000 lx if its reflectivity is at least 5%, achieving a measurement accuracy of 1 mm in a range between 0.9 m and 1.5 m.

1. まえがき

二足歩行ロボットが自由に歩行するために、床面までの相対距離をリアルタイムで測定することが求められている。

そのために Honda では屋内での歩行を対象として床面センサ⁽¹⁾ (Fig. 1)を開発し、ASIMO に搭載した。床面セン

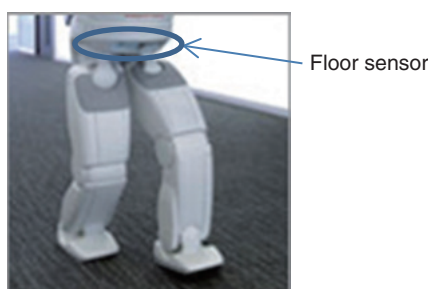


Fig. 1 Floor sensor of ASIMO

サは立体視の一手法である光切断法を利用している。この手法はライン光を投影し、その画像上の位置から三角測量の原理で距離を測定する手法⁽²⁾ (Fig. 2)であり、投影器を利用することで無地の面に対しても距離が測定できる。通常の光切断法においては、1本のライン光をスキャンして平面までの距離を測定するが、歩きながらスキャンさせると、スキャン中に平面までの距離が位置によって変化して

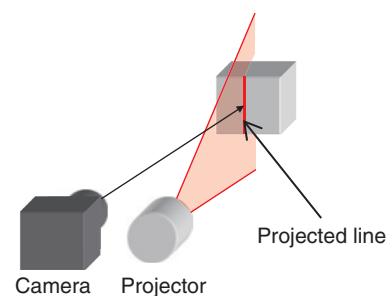


Fig. 2 Light-section method

* 基礎技術研究センター

しまうために測定できない。そこで、複数本同時に投影することで、ラインごとの同時性を保ち、平面までの距離を歩きながらでも測定可能としている。

簡易な画像処理でラインを検出するために Fig. 3 のようにライン光以外は黒く写るようにした。具体的には光源に狭帯域波長で発光するレーザを利用し、カメラには狭帯域波長だけを透過するバンドパスフィルタを取り付けた。レーザの波長を近赤外光とすることで、近赤外光がほとんど出ていない蛍光灯下ではライン光だけの画像が得られる。

ところが、太陽光下では近赤外光が非常に強いため、Fig. 4 のように床の模様が見えてしまうことがある。その場合、床の模様が線状であるとライン光とその模様が区別ができず、太陽光の差し込む窓際では利用できない。

光源の強度を上げれば相対的に環境光の影響を低減できるが、安全性に問題が生じる。レーザのようなレンズにより1点に集光できるような光源は、眼に対する安全性条件が厳しく、光源の強度を上げることは困難である。また、レーザ光源以外では距離によらず明確なライン模様を投影することが困難であり、光切断法は利用できない。

投光を用いない ASIMO の頭部でも使われている多眼立体視は眼に対して安全であるが、無地の面については距離が測定できない。三角測量の原理で距離を求めるとき、画像間で対応を取るために明確な画像の特徴を必要とするからである。床面に明確な特徴のない無地や無地に近いことは特別なことではないため、多眼立体視も床面に対する距離センサとしては利用できない。

模様がないところでも距離を出せるようにするには、数 m 程度の距離であれば模様の投影器を使って物体表面に模様を付加することで解決できる⁽³⁾(Fig. 5)。ただし従

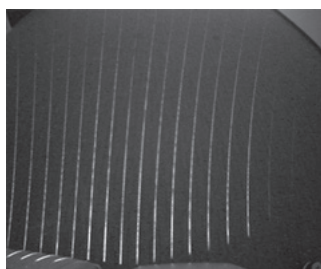


Fig. 3 Good image for floor sensor



Fig. 4 Bad image for floor sensor

来のカメラを使ったシステムでは、太陽光下においては模様が不鮮明になり測定不能であった(画像例は後述)。太陽光下でも立体視の対応処理に使える鮮明な模様が投影された画像を得られるようにすれば、無地の面でも距離が測定できるようになる。

そこで、次のような要件でシステムを開発した。

- (1) 不定形の無地の面までの距離を 0.9 m から 1.5 m の範囲で制御に十分な精度で測定すること
- (2) 10 万 lx の太陽光下で使えること
- (3) 光源が眼に対して安全であること (Class 1 に適合)

本論文では、システム原理、実装、計測結果について報告する。

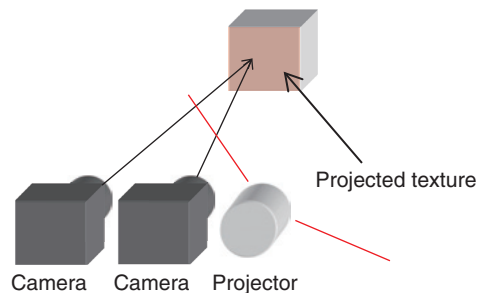


Fig. 5 Projector stereo camera system

2. システム原理

本研究では2台のカメラと1台または2台の模様投影器により投影式多眼立体視システムを構成した。そして、眼に対する安全性を確保しながら太陽光下でも模様が見えるようなカメラと投影器を開発した。

それぞれの構成要素について環境光への耐性向上の原理を説明していく。

2.1. 差分カメラ

環境光の影響を無くすために、投影したときと投影していないときの画像の差をとることで、両方に共通の環境光成分は打ち消されて無くなるという原理を利用する (Fig. 6)。仮に、投影していない環境光成分だけの2枚の画像を順に撮影し画像間の差をとると、動きのない場合は差が0 (ゼロ)になる。つまり、真っ黒い画像が得られる。

動きがある場合は画像間の時間差により撮影対象の画像位置が変化してしまっているため、差をとっても厳密な0 (ゼロ)にならない。ところが、移動しながら撮影する場合でも、10 μ sec 以下の時間間隔で撮影すると、ロボットの歩行程度では画像上で白と黒の境界であっても画像のずれによる誤差はノイズ以下になるため無視できる。しかし、10 μ sec での露光だけで十分な明るさの画像を得ようとすると、光源はその瞬間に極めて明るい光を出す必要が

ある。ところが、そのような光源はロボットに搭載することは困難である。

そこで、時間差を0（ゼロ）に近づけつつ十分な明るさの画像を得るために、短時間露光画像を何枚も積分する手法をとる。この場合積分期間を5 msec とすると、時間差が50 μsec 以下であれば動きにより発生する誤差はノイズ以下となり無視できる。投影器として発光間隔が100 μsec 、発光時間が数 μsec のものは入手可能であり、5 msec の間に50回積分可能であるため画像として十分な明るさが得られる。

しかし、短時間露光した画像を撮影のたびに100 μsec 位以下で読み出して積分することは困難である。1秒間の読み出し枚数で言えば、毎秒10万枚になり、そのような高速読み出しは、大型の高速度カメラでしか実現できない。

そこで、画素内で高速にノイズもなく積分可能であることに着目し、電荷読み出しと積分動作を画素内で行わせ、差分を画素外で行うようにした。

画素構造の単純なモデル (Fig. 7) と、その画素内で発生した電子を積分する流れ (Fig. 8) を示す。単純化した1画素には中央に光電変換部（フォトダイオード）があり、左右に電荷蓄積部（キャパシタ）がある。光電変換部と電荷蓄積部の間には電子の移動を制御する転送ゲートがある。

画素構造のAからA'の間の経路におけるポテンシャルを示した図では上にあるほどポテンシャルが高いことを示し、電子はポテンシャルの低い方、つまり下へ移動していく。移動経路にポテンシャルの高いところがあると乗り越

えられずその手前に蓄積される。

一連の積分動作は、電荷蓄積部の電子を排出して0（ゼロ）にする処理から始まる。その後、光電変換部で発生した電子は転送ゲートを左右交互に開くことで、電子もその都度、左右交互に転送され、電荷蓄積部に積分されていく。積分処理を何回か繰り返した後で、蓄積された電子のレベルを読み出すことで画素信号が得られる。この転送ゲートで交互に積分する動作は1秒間に10万回以上繰り返すことが可能であるが、積分した画素信号を全画面にわたって読み出すことは最大50回程度である。

読み出した信号について同じ光強度入力で出力が同じになるように補正を行い補正後に差分を取る。画素信号はそのままでは感度差やオフセット差により、たとえ同じ強度の光が全画素に入射したとしても出力は画素ごとに異なってしまうので補正が必要である。補正することで撮影環境

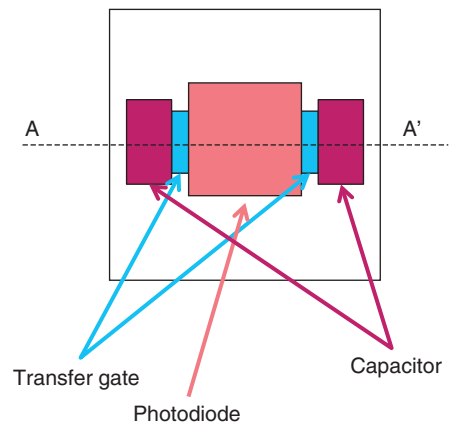


Fig. 7 Simple pixel model

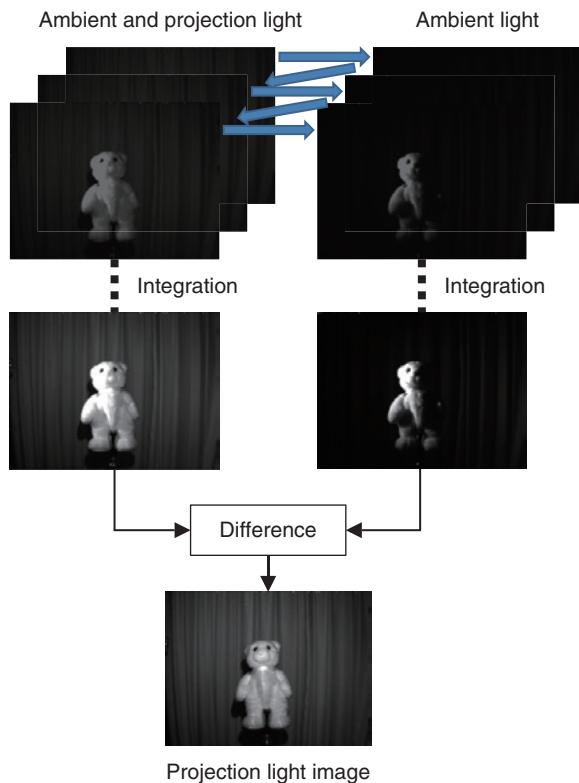


Fig. 6 Integration difference method

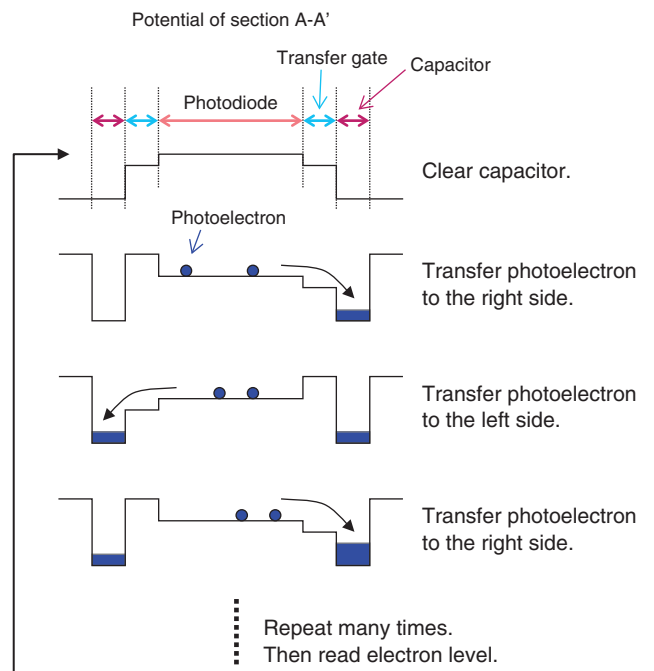


Fig. 8 Integration sequence

に変化が無ければ出力は0(ゼロ)となる。

画素内で差分を取ることは実現可能であるが、補正ができないため、差分を撮像素子内で行わないようにした。

2.2. 投影器

投影器の光源には短時間で大出力の狭帯域波長光を出力可能なことからレーザを採用した。レーザの前に拡散板を配置することで、レーザであっても光源に広がりが生じ、レンズで集光しても1点に光が集まらないようになる。拡散板により網膜上で集光されないため数十倍安全性が向上する。

模様様の投影方法にはモアレ方式を利用した (Fig. 9)。等間隔の格子を平行に離して配置することで、位置により光源が見えたり遮られたりすることで縞模様が投影される。視点1から見た場合は格子が重なって見えることで光源がスリットの間隙から見える。見る位置を変えることで光源の見える量が減り、視点3ではスリットに遮られて光源は見えない。視点の位置に対象があるとすると視点1では明るく、視点3では暗く対象が見えることになる。つまり、視点の位置に白色の板を置いたとすると縦じまの模様様の投影される (Fig. 10)。

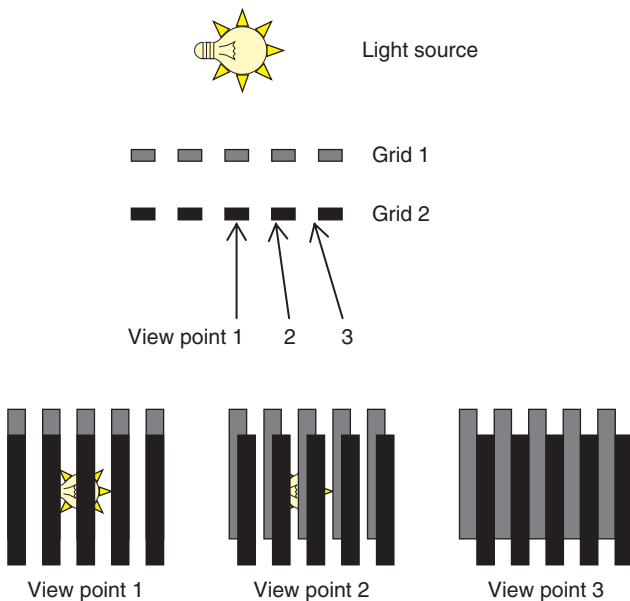


Fig. 9 Moire method



Fig. 10 Moire image

3. 差分カメラシステム

差分カメラシステムの構成要素と基本的処理について概説する。

3.1. システム構成

2台の差分カメラに1台または2台の投影器を搭載している (Fig. 11)。撮像素子の有効画素数は 640×480 、1画素の大きさは $12 \mu\text{m}$ 角、基線長は 170 mm 、レンズの焦点距離は 8.5 mm である。

差分カメラは2台のカメラヘッド、カメラ制御基板、インタフェース基板で構成されている (Fig. 12)。撮像素子から出力された映像信号は、カメラ制御基板、インタフェース基板を経てPCへ転送される。カメラ制御基板の指示により投影器はレーザダイオード (LD) を発光させる。

カメラからは積分された画像が出力され、PCによって線形補正を行った後で差分をとり立体視処理によって距離情報を得る。

3.2. 画素回路

1画素内の回路は光電変換部、転送/ドレインゲート、電荷蓄積部、読み出し回路に分かれる (Fig. 13)。光電変換部は光を電子に変換する。転送ゲートの先は電荷蓄積部につながっていて、発生した電子は蓄積(積分)される。ドレインゲートの先は電源につながっていて、発生した電子は消滅する。電荷蓄積部にたまった電子は読み出し回路により電流の大きさに変換されて画素の外に読み出される。今回製作した素子は電荷蓄積部を四つ持つが、差分カメラとしての動作においてそのうち二つを使用する。

画素から読み出された信号は素子内でAD変換され、14ビットのデジタル信号として外部へ出力される。

3.3. 画素構造

1画素のサイズは一辺が $12 \mu\text{m}$ の正方形である。マイクロレンズの焦点となる位置に光電変換部を配置している。光電変換部を埋め込みフォトダイオード構造とするこ

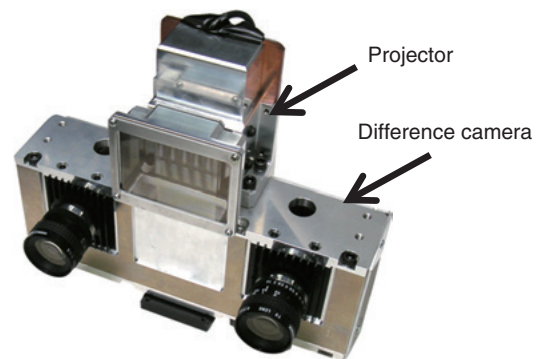


Fig. 11 Difference camera system

とでノイズの発生を低減している。光電変換部で発生した電子は転送ゲートを通して四つある電荷蓄積部のいずれか、または、ドレインゲートを通してドレインへ送られる。

3.4. 投影器

投影器は半導体レーザの前に拡散板を置き、その先に2枚の格子を配置した。投影器の光源にはピーク出力300 W、波長800 nm、最短発光間隔100 μsec の半導体レーザを使用している。縞模様を投影するために使用した格子は、線幅が0.25 mm、間隔が0.25 mmの縦縞をガラス板に

転写したものである。格子板と格子板の間隔は20 mmである。

2眼立体視用に縦縞と斜め縞の2種類の投影機を組み合わせ、誤対応が発生しないようにしている。縦縞だけでは左右の対応を取る際の探索範囲に同じパターンが繰り返り現れてしまい、距離が一つに決定できないが、斜めの縞を加えることで一つに限定され、距離が決定できるようになる。事前におおよその距離がわかっている場合は探索範囲を狭く限定できるため縦縞だけで十分である。

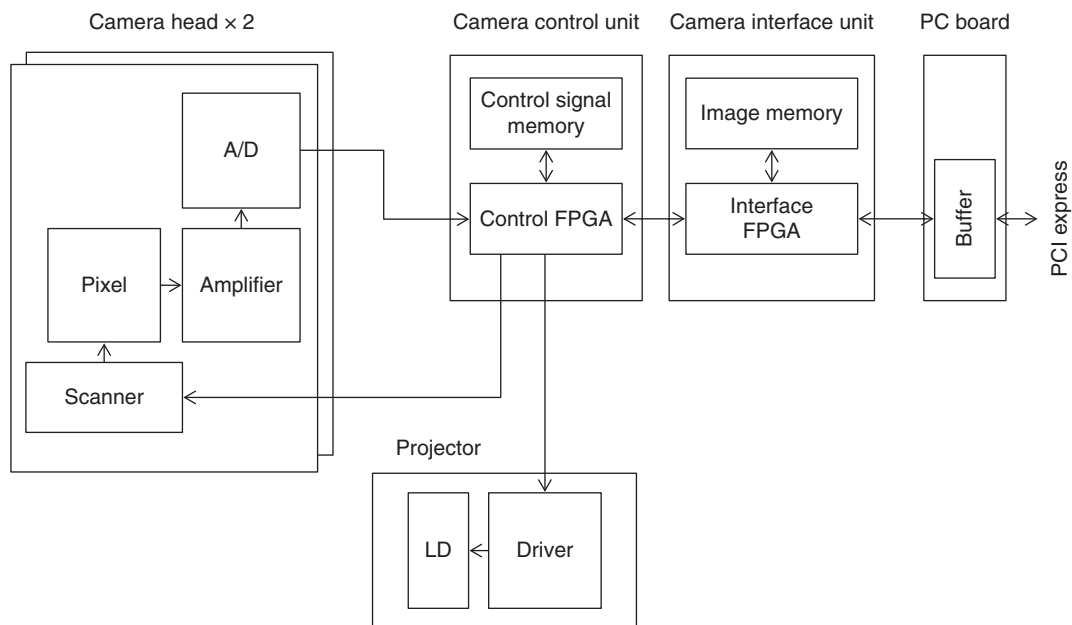


Fig. 12 Difference camera block diagram

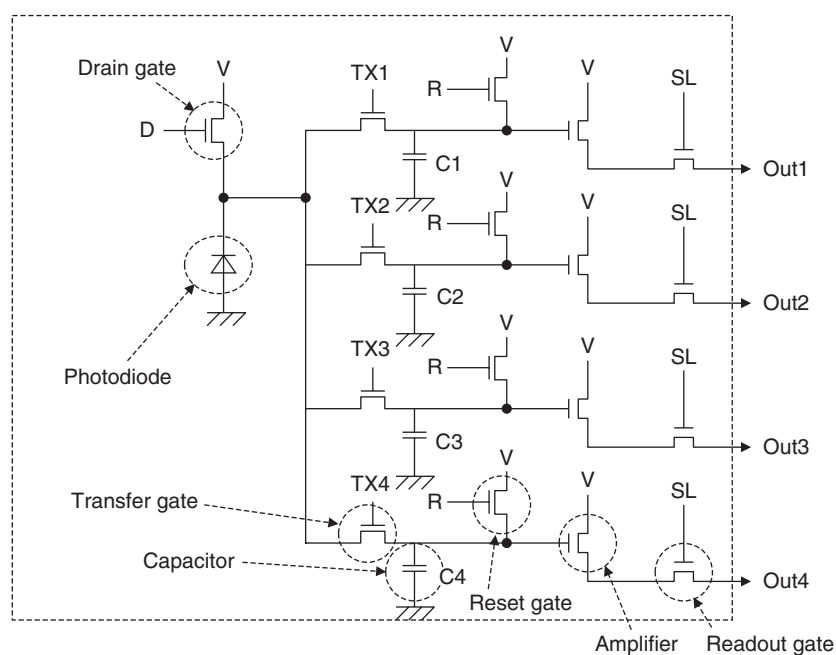


Fig. 13 Pixel circuit

3.5. シャッター制御

1回の露光期間は100 μsec 、露光回数は50回である (Fig. 14)。露光開始から終了までの時間 (露光期間) は5 msec となる。受光した光パルスで発生した電子を十分転送できる期間だけ転送ゲートを開き、それ以外では発生した電子をドレインゲートを開いて捨てている。

3.6. カメラ映像信号処理

同じ光強度の入力に対して出力が同じになるように、電荷蓄積部ごとに多段階の折れ線近似で補正する。この補正により画素間の出力値のばらつきは、光子の統計的揺らぎによって発生する除去不能なショットノイズ以下になる。

線形化した信号について差分を取る。差を取った結果としてマイナスになることがあるため、差の結果にオフセットを加えてマイナスが発生しないようにしている。

3.7. 立体視処理

入力画像のひずみを補正しエピポーラ線を合わせる変換をし、明度補正をしてから、対応処理を行う。対応付けには SAD (Sum of Absolute Difference) を利用する。対応をとる領域の大きさは横13×縦11画素である。

明度補正は領域の平均輝度で中心画素の輝度を正規化する処理で、反射率の低い領域 (暗い領域) と、反射率の高い領域 (明るい領域) の強度が同じようになり SAD の対応処理結果の信頼性を一定のしきい値で判定できるようになる。

暗すぎる領域を補正するとノイズが大きくなりすぎるので暗すぎる領域は補正しないようにしている。

4. カメラシステムの距離精度

2眼立体視カメラシステムとしての距離精度を計測した。計測対象は黒い平面と白い平面とした。黒い平面の反射率は5%で、白は83%である。外乱光としてはハロゲンライトを使用し、800 nm 付近でのパワーが10万 lx に相当するように調整して照射した。投影光強度は Class 1 で許容される最大強度の70%としている。

平面とカメラ間の距離を直動ステージで2 cm ごとに変え、検出した距離情報のうち画面中央付近の実空間で20 cm 四方の領域について平均を取ったものを平面までの距離とした。

計測に利用した画像と、発光時以外にも露光を継続する通常のカメラの露光タイミングで撮影した画像を Fig. 15 に示す。差分カメラであれば外乱光の有無によらず同様の画像が得られる。通常のカメラの場合は外乱光により飽和して映らなくなるか、飽和しないように感度を下げると模様が薄くなってしまう。通常のカメラは光源の発光期間以外にも積分動作を行ってしまうため、投影光だけによる画像の明るさを同じにしたとき、環境光が入るとより明るい画像になってしまう。つまり、環境光の影響を大きく受けてしまう。

計測結果を距離と誤差の関係としたグラフとして Fig. 16 に示す。誤差は、平均距離と真値との差の絶対値に、10回測定した距離情報の標準偏差 (σ) を3倍した値 (3σ) を加えて表示している。黒い平面を外乱光の無い条件で測定したのが黒い破線、外乱光のある条件が黒い実線、白い平面を外乱光のない条件で測定したのが灰色の破線、外乱光のある条件が灰色の実線である。

反射率や環境光によらず0.9 m から1.5 m の範囲で誤差

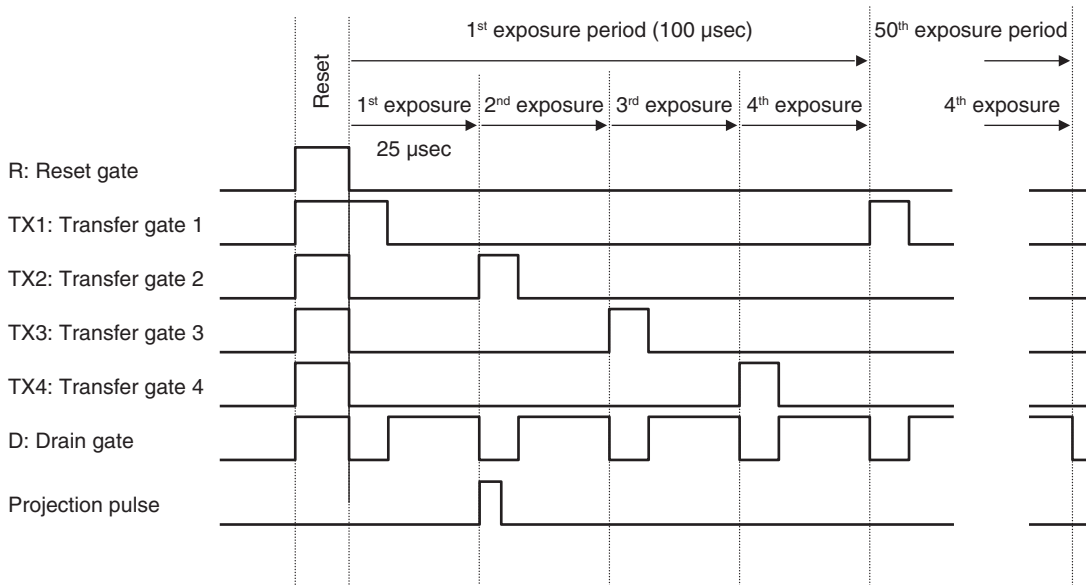


Fig. 14 Shutter timing

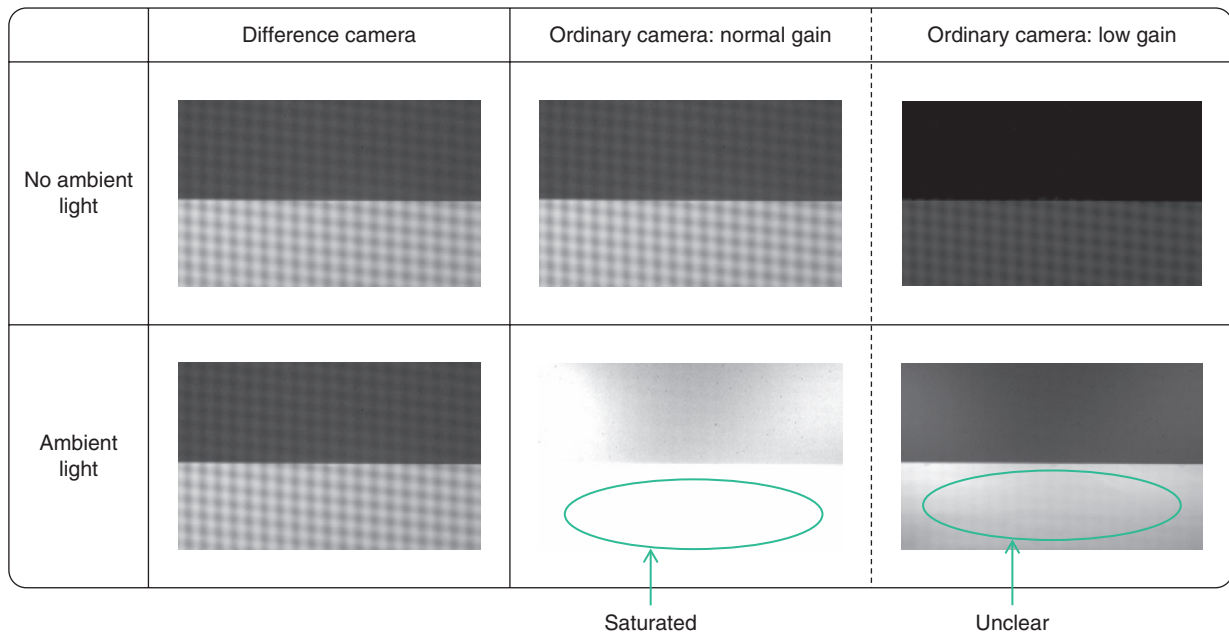


Fig. 15 Difference image and ordinary image

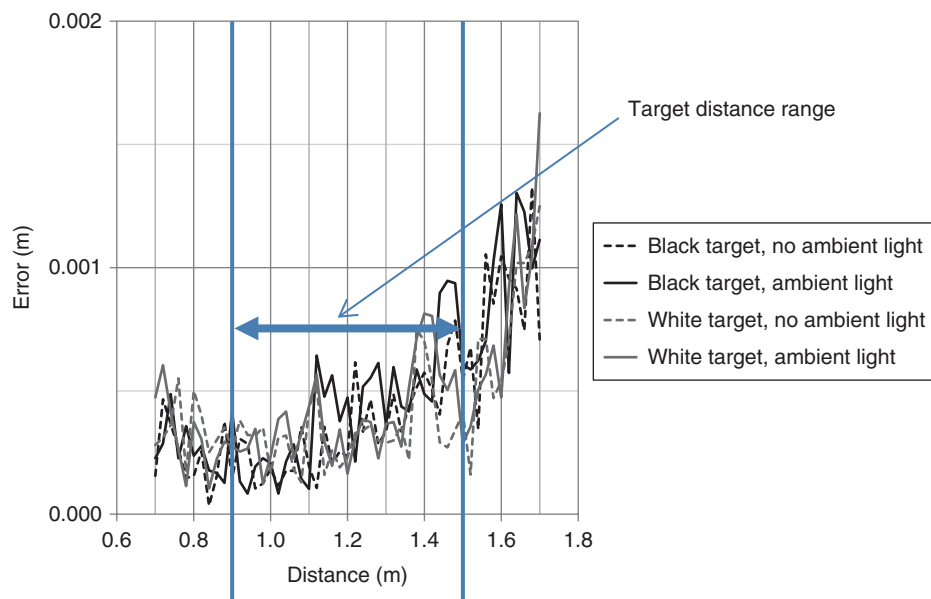


Fig. 16 Measurement error

が 1 mm 以下であることがグラフからわかる。これは歩行制御に十分な精度である。

5. 差分カメラの応用例

外乱光を除去して投光成分だけの画像が得られることから、距離センサ以外の応用として、認識性能の耐環境性向上に利用できる。つまり、屋内で照明をあてて適切な画像処理をするようなことが、屋外でも可能となる。

投影器の格子を外して模様の無い投光器として、屋外で太陽光が当たる向きを変えて画像を撮影した。その画像を

ASIMO で使用している顔認識処理に適用し、通常画像と差分画像との認識結果を比較した (Fig. 17)。

緑の四角い枠は顔検出結果の領域を示している。画像左の緑、または、赤い帯は登録してある人との一致度 (スコア) を示す帯である。長いほど良く一致していることを示す。緑であれば同一の顔であり、赤であれば異なる顔と判定している。

得られた画像から差分画像では太陽光の影響を受けていないことが明らかであり、認識結果も影響を受けていないことを示している。逆光の通常画像で画面上部に見られるゴーストも差分画像では除去されている。

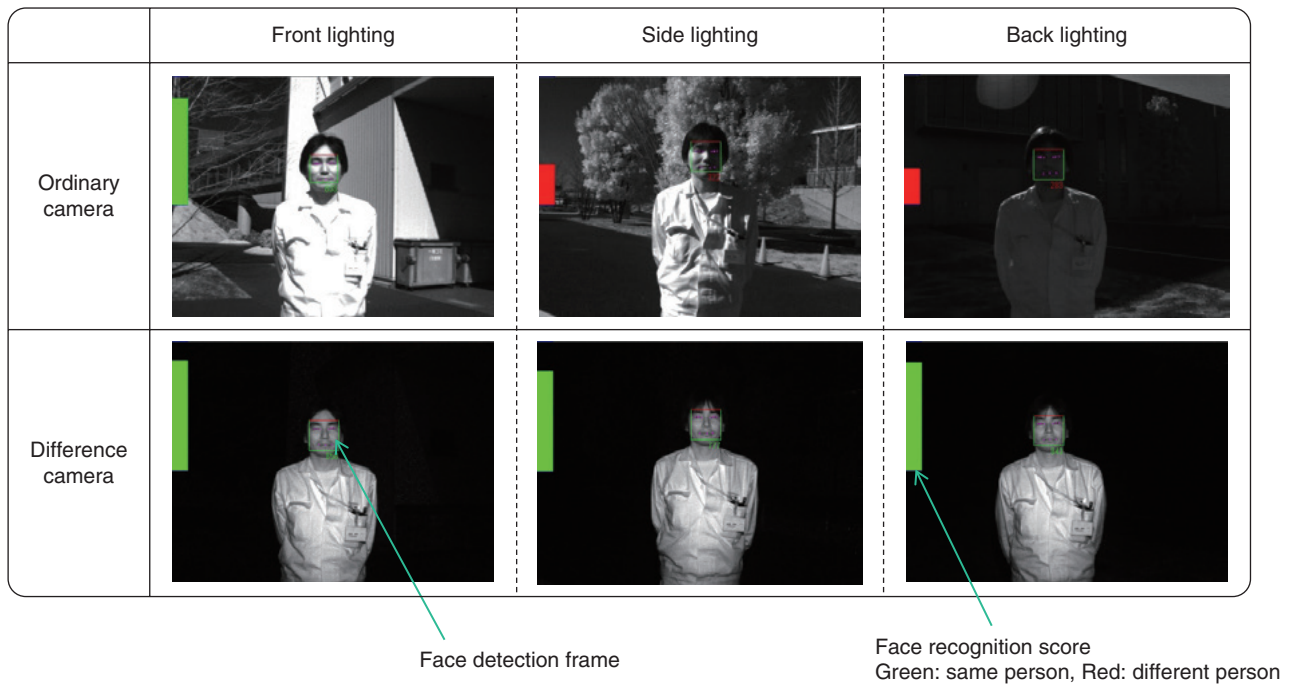


Fig. 17 Face recognition results

6. まとめ

太陽光下において無地の面に対しても距離が計測できる差分カメラシステムを開発した。

対象物の反射率や環境光によらず 0.9 m から 1.5 m の範囲でロボットの歩行制御に十分利用可能な距離精度の 1 mm を達成した。

模様のない投光をすることで顔認識精度も向上させられることを示した。

謝 辞

本研究にあたり、撮像素子開発にご指導いただいた静岡大学 川人祥二先生に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (2) Oike, Y., Ikeda, M., Asada, K.: Design and Implementation of Real-Time 3-D Image Sensor With 640 x 480 Pixel Resolution, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.39, No.4, p.622-628(2004)
- (3) Konolige, K.: Projected Texture Stereo, Robotics and Automation (ICRA), p.148-155(2010)

■ 著 者 ■



青山千秋