

特集 移動ロボット用ロボストビジョン*

Robust Vision for Mobile Robot

北 岸 浩 一

Kouichi KITAGISHI

井 上 裕

Yutaka INOUE

大 島 健 二

Kenji OHSHIMA

This paper addresses the problems with the machine vision systems on mobile robots, for which conventional illumination controls such as stabilized lighting or light shields are not available, as mobile robots have to travel through the plant and perform various operations at any given location. To cope with the lighting fluctuation caused by daylight, the weather or site situation, a newly developed vision system automatically measures the ambient illuminance with an illuminometer and controls the camera, employing the best combination of exposure time and lens aperture. In addition, a highly efficient gray-level image processing method is utilized to identify patterns based on the normalized correlation coefficient in order to tolerate the variance of target products regarding the color or posture. As a result, the recognition reliability vis-à-vis the disturbative fluctuation is enhanced by 30 times compared to a conventional vision system.

Key words : Robot Vision, Automation, Image processing, Pattern search, Robustness

1. はじめに

近年、消費者嗜好の多様化や、製品開発競争の激化などにより、従来安定的に確保された生産量、期間が予測できない生産環境になり、トランスファーラインでは、生産量の予測が外れて生産能力が過剰となったり、生産量の急激な増大にシステム構築が立ち後れたりする問題がある。そこで人間の持つ柔軟性に着目し、従来のトランスファーラインとは異なり、生産量によって機械を抜き差し可能な生産システムとして、多能工作業、工程間の移動、状況に応じた作業連携、増設機械への迅速な作業移植を可能といった、人に取って代われる移動ロボットが開発されてきた¹⁾。この移動ロボットは、それぞれの工程で部品の把持、組立てや外観検査の機能が要求されていることから、視覚の機能が必要となる。

視覚技術と産業用ロボットを組み合わせることによる組付け、検査工程の自動化は従来から数多く行われている。これらに用いられている視覚認識手法としては、入力画像のコントラストを利用して2値化により対象の形状を判別する手法が主流となっている。この手法は、デジタル画像という大きな情報量を持つデータを2値化により早期にデータ圧縮が可能であり、小規模の演算能力で短時間で結果を出力することが求められるFA用途に適していると考えられる。この手法が有効に機能するためには、入力画像のコントラストを適正に確保することが重要であり、そのため認識対象と目的に応じて適切な照明を設置し、外乱光を遮光

板などで防ぐなどの工夫が必要となっている。

しかしながらこのような手法は、工場内を自律的に移動して様々な工程で作業を行なう移動ロボットには適用できない。ロボットの作業空間を考慮すると、外乱光を防ぐ遮蔽板の設置は不可能であり、対象を限定してそれに適した照明の設置も困難となるためである。従って、移動ロボット用視覚システムには、人と同じオープンな環境下で、様々な撮像条件の変動を許容しながら認識精度を確保することが求められる。

今回、このような課題を解決した新しい視覚システム「ロボストビジョン」を開発したので報告する。

以下2章では、昼夜を問わず稼働することから、照明環境が劇的に変化する状況を実際の工場で調査した結果を基に、照度計を活用し、その時点での環境に最適なレンズ絞りと露光時間を選定することにより、入力画像の明度を安定化する手法について述べる。

3章では、ワークのばらつきや照明方向の変化に起因する画質の変化に対応するため、画像の持つ濃淡情報を活用しロボスト性を確保しながら、処理時間を短縮する認識手法について述べる。4章では、開発したシステムの構成と効果について報告する。

2. 照度変化対応

2.1 従来技術の問題点

移動ロボットはFig. 1のように移動機構を持った台車の上にロボットアームを取りつけたもので、工程間を移動し設備内のワークの把持、組付け、検査を行う。

*2003年9月12日 原稿受理

そのためロボットアームとの干渉を考慮すると、従来の視覚システムのように設備を遮光板で囲うことで外乱光を防ぎ、固定の照度、向きで照明を当てることで認識力の安定性を確保することが困難である。移動ロボットは24時間稼働することから、視覚システムとして、昼夜を含む様々な照度変動を許容する必要がある。

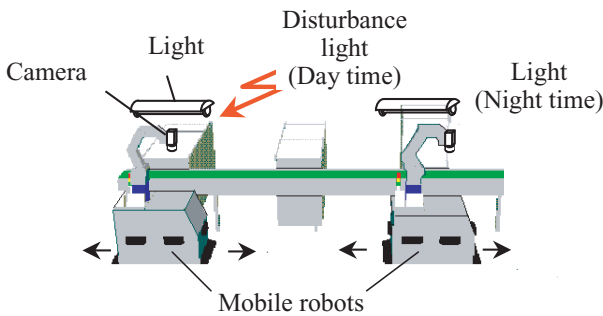


Fig. 1 Mobile robot's vision system

移動ロボットが実際に稼働する工場環境での照度変化を調査した結果をFig. 2に示す。太陽光の影響が一番受ける夏至前後の晴天、曇り、雨の日に、それぞれ1日(24時間)調査を行った。その結果、夜間は400lxと変化は無いが、最も明るい晴天の日の正午前後は2000lxと、最大で1600lxの明るさ変動があることが明らかになった。したがって、移動ロボット用の視覚には、400~2000lxの範囲の照度変動に対応可能な性能、すなわちダイナミックレンジの拡大が要求される。

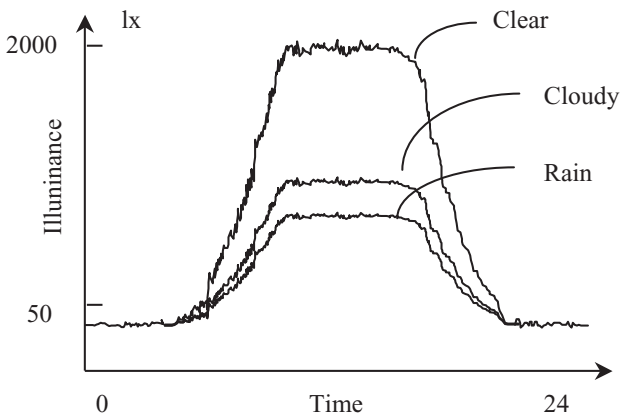


Fig. 2 Range of illuminance in a day

Fig. 3に従来手法による撮像と、今回の要求仕様とのダイナミックレンジの違いを示す。従来の視覚装置を組み込んだ設備では、周囲の照度変化の影響を受けない工夫により、高々50lxの変動に抑制し、入力画像の明るさを一定にしてきた(Fig. 3の黒色領域)。CCDカメラのダイナミックレンジの範囲外に周囲の

明るさ変動がある場合(Fig. 3の斜線領域)には、入力画像がサチュレートするなど十分なコントラストが得られず、安定的な認識ができない。

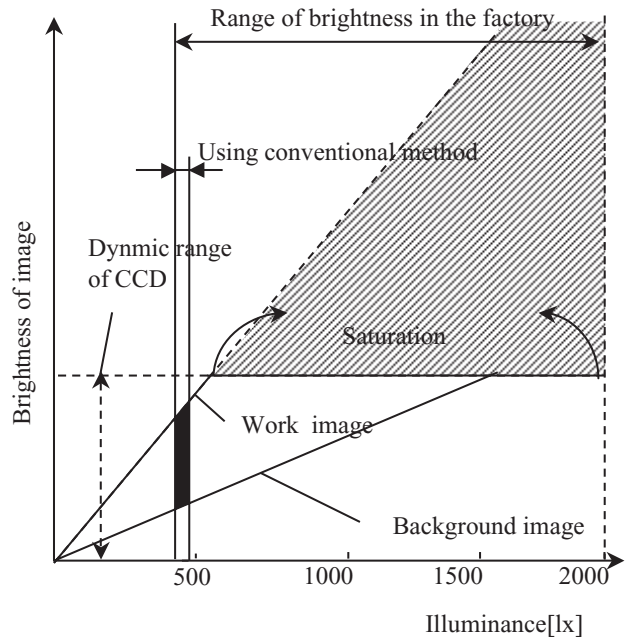


Fig. 3 Required dynamic range

カメラのダイナミックレンジを拡大するには、絞りとシャッター速度を制御する方法が考えられる。しかし、絞りを可変にする場合には被写界深度の変化を考慮する必要があり、シャッター速度を可変にする場合には入力画像のブレや、蛍光灯の点滅の問題が発生する。以下に、これらの課題への対応方法について述べる。

2.2 照度変化対応手法の検討

変動しているのは周囲の照度であることから、その照度を計測し、フィードバックしてシャッター速度または絞りを制御することにより、入力画像のワーク部分の明るさがCCDのダイナミックレンジを越えないようにつ、入力画像のワークと背景のコントラストを最大にすることを考える。

照度が小さく絞りを開く場合は被写界深度が小さくなり、必要な精度が維持できない場合も考えられる。例えば、ワークが入っている通い箱や、その仕切りの形状変化から生じるカメラとワーク間の距離の変動が x であった場合、被写界深度と絞り値の関係は式(1)から求めることができる。

$$x < X = \frac{\delta}{m} \frac{F(1 + \frac{1}{m})}{1 \pm \frac{F}{f} \times \frac{\delta}{m}} \quad (1)$$

F : F ナンバー (絞り値)

m : 倍率

δ : 許容錯乱円径

f : 焦点距離

X : 被写界深度

当社での活用条件を代入して解くと、絞りF4以上を確保する必要があった。

一方、シャッター速度制御はアームの振動による入力画像への影響を小さくすることを考えると速いほうがよく、1画素未満に抑えることが可能なシャッター速度を選択することが必要である。ロボットアーム先端に取り付けられたカメラはFig. 4のように配置されており、ロボットアームの振動によるぶれ $S(\text{pix})$ は、式(2)で表すことができる。画像の解像度を0.25mmが必要であり、この場合、1/60秒以下の露光時間に抑える必要があることが分かった。

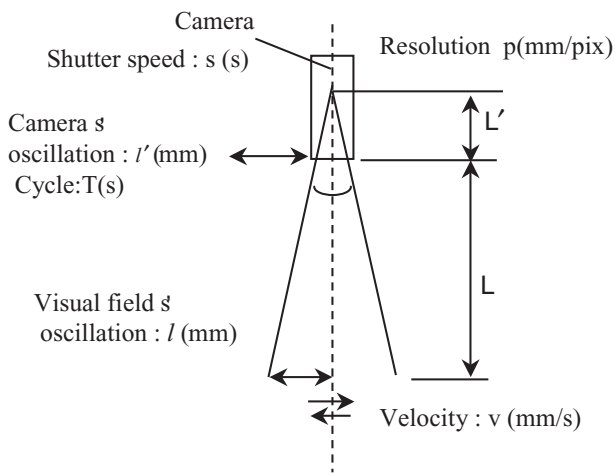


Fig. 4 Layout of camera

$$\left. \begin{aligned} l &= \frac{\varrho'(L + L')}{L'} \\ v(t) &= \frac{2\pi}{T} \varrho \left(\cos \frac{2\pi}{T} t \right) \\ v_{\max} &= \frac{2\pi \varrho}{T} \\ \text{ぶれ量} &: S(\text{pix}) \\ S &= v_{\max} \times s / p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

しかしながら、特に夜間の稼働時に支配的な光源となる蛍光灯は、電源周波数の2倍の周波数で点滅しており、この場合シャッター速度が1/120秒より速くなると、その影響を受け、画像入力のタイミングで画像の明るさにばらつきが生じるという問題がある(Fig. 5, AとB)。従って、夜間での稼働も考慮すると、シャッター速度は1/120秒以下で制御する必要がある。

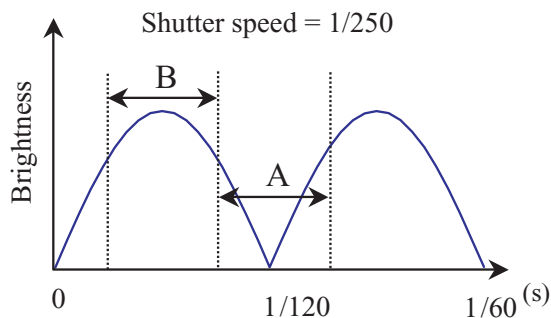


Fig. 5 Flicker of fluorescent light

以上に挙げた条件を満たしながら周囲の照度に応じてシャッター速度又は絞りを切りかえることとした。その結果について以下に示す。

2.3 照度変化対応結果

これまで検討してきた内容を実ワークを用いてテストにより確認した。実際の絞り、シャッター速度制御可能エリアはFig. 6の制御可能エリア(網掛部)となる。ここでは、機械式である絞りの開閉は耐久性に影響を与えることから、電気的に制御可能なシャッター速度を優先的に使用し、シャッター速度が変更できない場合に限り、絞りを制御することとした。Fig. 7に各種照明条件下での制御の効果を示した画像の例である。(a)は(夜間)の場合の入力画像で、絞りがF4、シャッター速度が1/60秒である。(b)は照度2000lxで制御を行わない場合の入力画像であり、サチュレートしている。これに対し、絞り、シャッター速度を制御した場合が(c)である。被写界深度を確保しながら照度変化に対応していることが分かる。これにより、従来の視覚システムに比べ、照度変動に関して約30倍のダイナミックレンジを許容することができた。

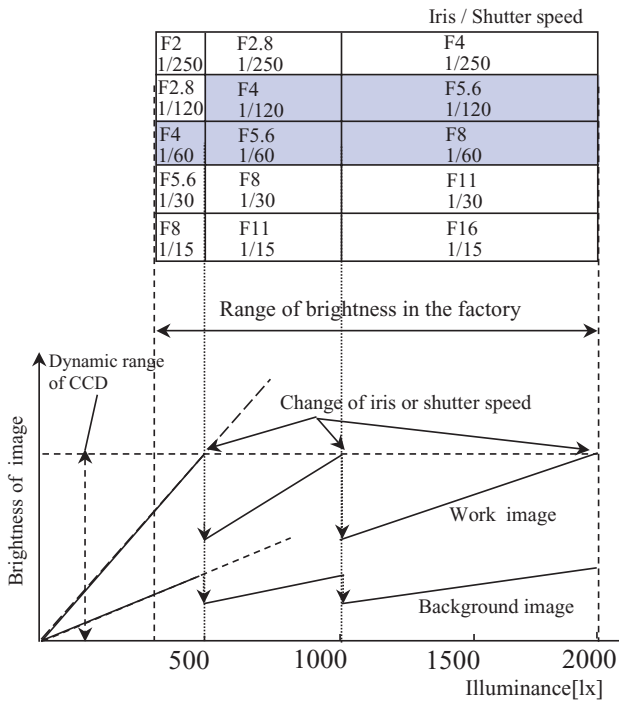


Fig. 6 Control method

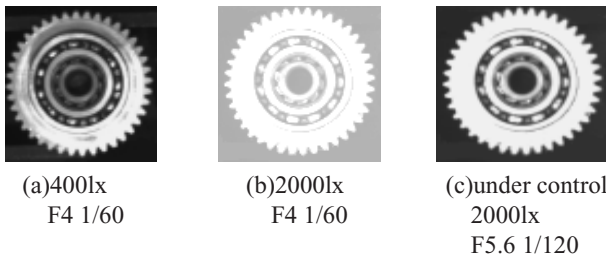


Fig. 7 Input image

3. 画質変動対応

3.1 従来技術の問題点

認識対象の工業製品は、材料のロットや、加工機の状態により、表面状態が変動することがしばしばある。表面の色合いなどは工業製品の機能上問題とならない場合は生産過程でも管理外であることが多い。従来の認識手法ではこれらの要因を把握して、変動に強い撮像環境を確保することが可能であった。

しかし、移動ロボットが稼働するオープンな環境では照度変化に対応して露光量を制御したとしても、昼間と夜間では主となる照明の方向が異なる。昼間は主に全天からの様な明るさが有効であるのに対し、夜間は作業者のための蛍光灯照明が支配的となる。その結果、ワークの表面状態、傾きなどの影響を受けて入力画像に明るさムラが発生しやすくなるという問題がある。

Fig. 8に、従来手法の例として、2値化処理による外形形状・位置の認識手法をこのような画面内変動を受けた画像に対して施した例を示す。昼間に撮像した場合は、認識が成功しているが、夜間に撮像した例では、画面内の明度変動により、形状の認識に失敗している。

従来の2値化処理では、処理時間、装置のコストを削減するために画像の情報を圧縮して少ない情報で認識を行っているため、画面内の明るさ変化により、必要な情報が圧縮時に欠落したり、不要な情報が発生してしまい、誤認識につながると考えられる。

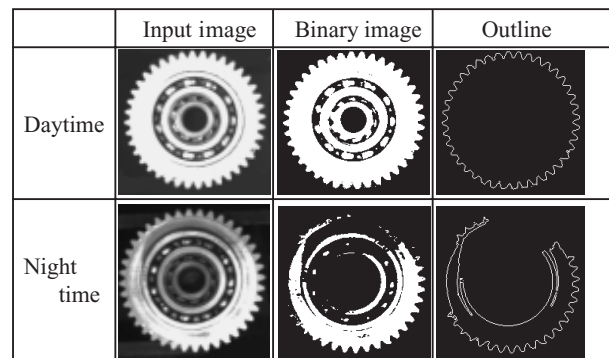


Fig. 8 Difficulty with conventional method

このような問題点を解決するには、元の画像の情報をそのまま認識に用いる濃淡画像処理による認識が有効と考え、以下に検討した。

3.2 濃淡画像処理による認識手法

濃淡情報を用いた認識手法として汎用性が高いといわれている正規化相関法の実用化についてまず検討した。正規化相関法の手法をFig. 9に示す。認識対象のマスター画像 $x(i, j)$ を記憶しておき、被検画像 $y(i, j)$ の探索範囲内すべての部分画像との相関値を評価し、最も評価の高い部位が、目標のパターンと判断する手法である。被検画像内の座標 (k, l) における相関値 S は、マスター画像の大きさを $M \times M$ 画素とすると式 (3) で表される。

$$S(k, l) = \frac{\sum_{i=1}^{M-M} \sum_{j=1}^{M-M} x(i, j) \cdot \sum_{i=1}^{M-M} \sum_{j=1}^{M-M} y(k+i, l+j)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{M-M} \sum_{j=1}^{M-M} x^2(i, j) \right] \times \left[\sum_{i=1}^{M-M} \sum_{j=1}^{M-M} y^2(k+i, l+j) \right]}} \quad (3)$$

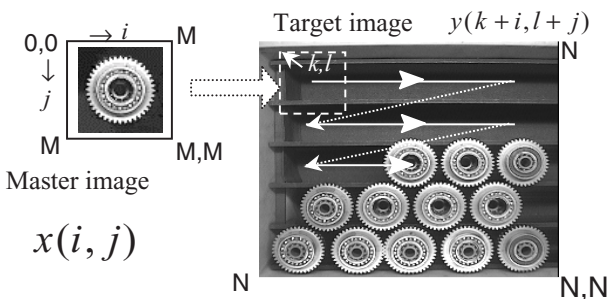


Fig. 9 Difficulty with conventional method

この評価式は多くの積和演算が必要となるため、このような計算に有効なDSPの導入をすすめることとした。しかしながら事前検討の結果、認識精度は高いものの、DSPをもってしても全画面走査においては計算時間が長くなり、FA用途に必要なサイクルタイムには全く不十分であることが判明した。そこで、FA用途に限定した特徴を利用して、探索精度を落とさずこの計算量を低減することを検討することとした。

Fig. 9に示すようなターゲットを探索する場合、マスタ画像内には、相関演算に有効でない背景部分の画素が多く含まれている。FA用途では、事前にマスタ画像を準備しておけるため、その段階で画像を加工し、不要な部分を削除することで、演算回数を低減することを考えた。

また、目標とする対象は画像内にディスクリットにしか存在しないことから、相関値が一定以下の近傍にはターゲットが存在しないと考えられる。従って、ある程度間引いて走査し、相関値の高いところを詳細に探索すれば精度を落とさず計算量が低減できると考えられる。加えて、間引き探索自体を、あらかじめ間引いた画像で行うことでさらに計算量を低減することを試みることにした。

すなわち、Fig. 9に示す探索の課題に対して、以下のようなステップで探索することを考えた。

- (1) マスタ画像、被検画像を、m画素間隔に間引き、縮小
- (2) 縮小したマスタ画像から、探索に有効な領域をP画素選択
- (3) 縮小被検画像に対して、粗サーチ
- (4) 原寸画像を用いて、粗サーチ結果の近傍を詳細探索

このときの演算回数は、式(4)で表すことができる。

$$Z = 5P^2(N/m - M/m)^2 + 5M^2\{2(m-1)\}^2 \quad (4)$$

間引き間隔mを変化させたときの、演算回数の変化を、粗サーチマスタ画素数Pごとにプロットした結果をFig. 10に示す。当社のアプリケーションでは、間引き間隔4画素、マスタ画素数63画素であれば、目標のサイクルタイムを満たすことが分かった。

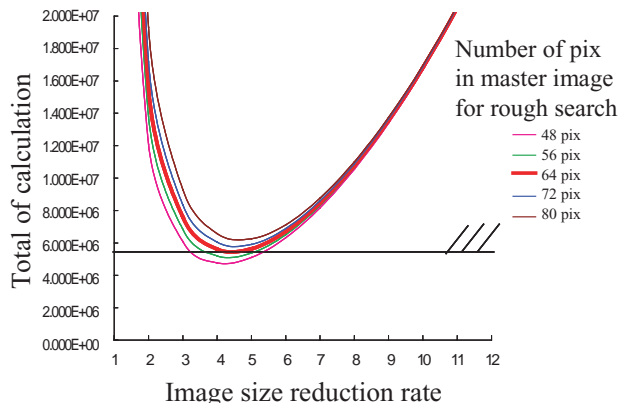


Fig. 10 Minimizatin of calculation time

次に、粗サーチにおける有効画素の選択方法について述べる。一般に画像処理の位置決めにおいては、輪郭形状などの明度が変化している部分に着目する必要がある。従ってマスタ画像の画素選択においては、画像の空間微分値の高い領域を優先的に選ぶことが有効であると考えられるため、まずシミュレーションにて検討した。

用いたサンプル画像をFig. 11に示す。(a)は微分値の大きい画素を優先したマスタ画像、(b)は均等にサンプルしたマスタ画像(c)は被検画像である。

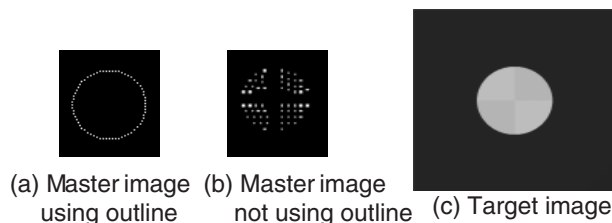


Fig. 11 Image samples for simulation

探索領域を走査したときの相関値をシミュレートした結果をFig. 12に示す。(a),(b)はそれぞれ探索に用いたマスタ画像Fig. 11に対応している。各縦軸は相関値であり、グラフの底面上x,y座標の0,0が正しい位置を示す。(b)では座標(0,0)から±4画素の範囲で高い値を示しているため、ピーク位置が不安定になると考えられる。(a)は座標(0,0)付近でピーク

クを持っており、安定した位置探索が可能である。これにより、マスタ画素の選択は、微分値の大きい領域を優先することが有効であることが示された。

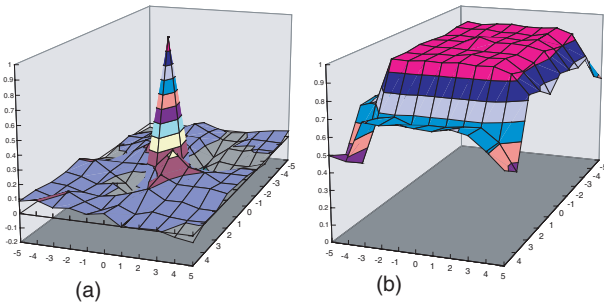


Fig. 12 Result of simulation

このシミュレーション結果をふまえて実際のワークで粗サーチの認識精度を実験にて確認した。間引き画素数を4画素として512×512画素のワーク位置が既知の画像80枚に対して、100×100画素のマスタ画像を粗サーチした結果が以下のFig. 13である。(a)は被検画像の例、(b)は粗サーチ用に間引いた画像の例、(c)粗サーチ用マスタを示しており、明度を持つ画素のみを使用している。(d)に、粗サーチ結果のピーク位置の真値からのX-Yズレをプロットしたものである。

すべてのピーク位置が±3画素以内に真値が存在することが確認でき本手法が有効であることが確認できた。

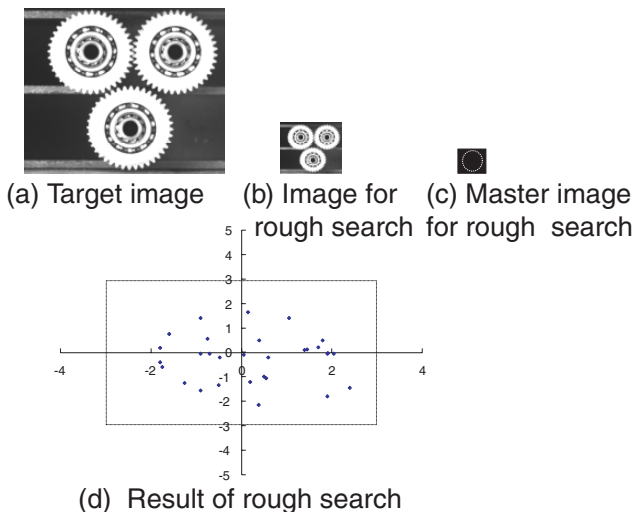


Fig. 13 Accuracy of rough search

4. 開発したシステム

開発したロバストビジョンシステムの概要をFig. 14に示す。

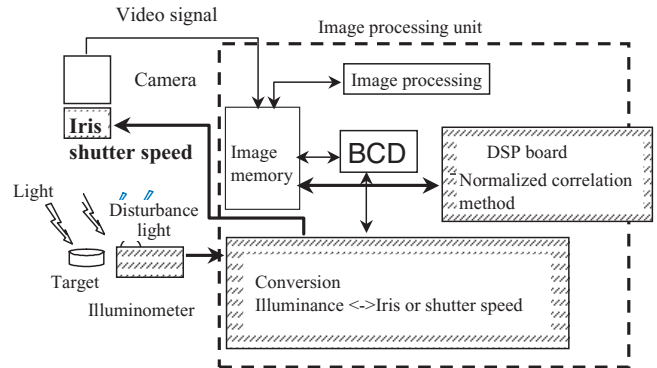


Fig. 14 Robust vision system

照度計を移動ロボットの台車上に装備し、外乱光を含む対象周囲の照度を常時測定可能とした。視覚装置内部には、環境の照度照度に対して適正なシャッター速度、絞り値を参照するための変換テーブルを備えており、計測した照度に応じてカメラのシャッター時間とレンズの絞りを制御可能とした。

また、新規に開発した濃淡画像処理による探索手法を高速に演算する専用のDSPボードを備えている。

Fig. 15にロバストビジョンの部品探索時のフローチャートを示す。

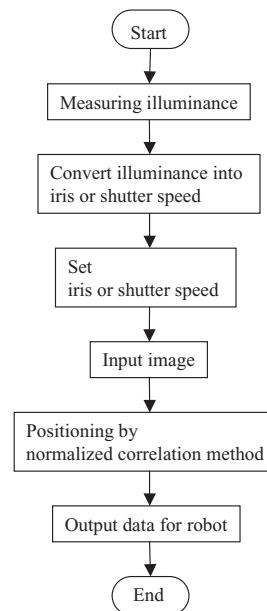
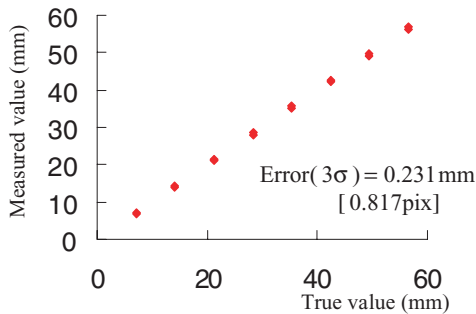
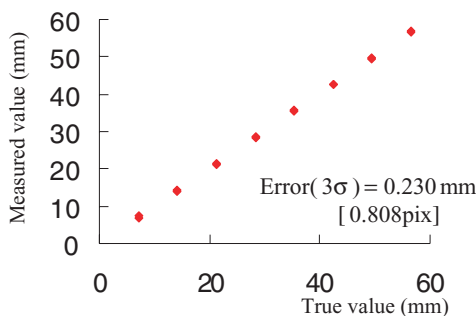


Fig. 15 Flow chart

このロバストビジョンを実際に移動ロボットに搭載し、工場内の稼働環境下での認識精度テスト結果を Fig. 16 に示す。



(a) Accuracy of measuring in daytime



(b) Accuracy of measuring at night

Fig. 16 Result of measuring

テストは1画素0.282mmの解像度の撮像条件で、実際のワークの狙い位置からのズレを計測し、真値との関係をプロットした。(a)は昼間、(b)は夜間の環境下で、周囲の照度はそれぞれ、2000lx、400lx、計測回数はそれぞれ80回である。

いずれも計測誤差 3σ は1画素以内となっており、今回開発したシステムが移動ロボット用視覚装置として、オープンな環境下で有効に機能することが示せた。

6. おわりに

移動ロボット用視覚システムとして、特に照明条件を整備できないオープンな環境下で、様々な撮像条件の変動を許容しながら認識精度を確保するために、以下のような技術開発を行った。

(1) 照度変化対応

400~2000lxと従来の30倍の変動幅で照度が変化する環境下で、入力画像をカメラのダイナミックレンジ内に収めるため、周囲の照度を照度計で計測し、被写界深度、ロボットアームの振動を考慮

したシャッター速度又は絞り値へフィードバック制御を行い、画像を入力する手法を開発した。

(2) 照明方法変化対応

昼間・夜間で異なる照明方法により照明ムラのある入力画像に対してのワーク認識に有効な手段として正規化相関マッチングに着目した。その手法に対して、実用上の課題である処理速度を、アルゴリズムの効率化、専用ハードの開発により高速化した。

これらの技術を導入した新しい視覚システムロバストビジョンの搭載により、移動ロボットは遮光板などの制約を設けることのないオープンな環境下で、外乱光(太陽光)による照度変化、照明方法の変化に依存せず、確実にかつ高速な視覚認識を行い、安定的な作業を行うことが可能となった。

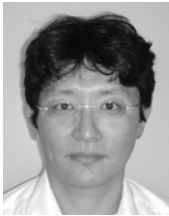
当システムを搭載した移動ロボットは当社の安城製作所RA2.0スタート組立てラインに導入され昼夜問わず稼働中である。

<参考文献>

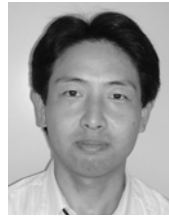
- 1) 花井, 他: “市場の不確実性に順応する生産システム(APS)の開発”, 精密工学会誌, Vol.65, No.8 (1999)



< 著 者 >



北岸 浩一
(きたぎし こういち)
生産技術部
生産システム関連の画像計測技術
開発に従事



井上 裕
(いのうえ ゆたか)
生産技術部
生産システムの開発に従事



大島 健二
(おおしま けんじ)
電機技術2部
オルタネータ用レギュレータの設計
に従事