

実物体と映り込みの分離方法

熊木 健二† 山村 毅† 田中 敏光‡ 大西 昇†*

†名古屋大学大学院工学研究科
‡名古屋大学大型計算機センター
名古屋市千種区不老町
*理化学研究所
名古屋市熱田区六番三丁目8-31

あらまし

本研究では、ガラスなどの透明物体に映り込んだ虚像と、その背後にある物体を分離する手法を提案する。一般に、ガラスの表面で反射する光は、ガラスを透過してくる光よりも強く偏光しているので、偏光フィルタを適切な角度（偏光角）で用いることにより、映り込み物体を除去することができる。偏光角は、ガラス及び映り込みを生じさせる物体のカメラに対する位置と姿勢により求めることができるが、これは、容易でない。そこで、偏光フィルタを少しずつ回転させながら取り込んだ複数枚の画像から各画素の最大値・最小値を求めることにより、実物体と映り込み物体の分離を行う。実画像に対して本手法を適用し、その有効性を示す。

A Method for Separating Real and Virtual Objects from Their Overlapping Images

Kenji Kumaki †, Tsuyoshi Yamamura †, Toshimitsu Tanaka ‡, Noboru Ohnishi † *

† Graduate School of Engineering, Nagoya University
‡ Computation Center, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-01 Japan
* Bio-Mimetic Control Research Center, RIKEN
8-31, Rokuban 3-chome, Atsuta-ku, Nagoya, 456 Japan

abstract

This paper proposes a method for separating real objects behind glass and virtual ones reflected on it. Generally speaking, light is more polarized when reflected on glass than when transmitted through it. This optical property allows us to eliminate virtual objects by a polarizing filter set to a proper angle, called "polarizing angle". This angle is calculated from the relative orientations of the glass and the virtual objects to a camera. However it is usually difficult to implement such calculation. Therefore, we use a series of images taken by rotating the filter. Obtaining the minimum and maximum images, we can separate real and virtual objects. Experiment with real scenes is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

我々を取りまく環境の中には、多くの透明物体があり、我々は映り込みという現象を当たり前のように目にすることができる。例えば、夜の電車の窓ガラスを見ると、車内の人や物体が窓ガラスに“映り込んで”しまうので、窓ガラスの向こうの景色を見ることができないことがある。このように、映り込みとは、ガラスなどの表面に虚像が現われてしまう現象であり、これにより透明物体の背後にある物体を認識することが困難になる。

我々は、見る位置（視点）を変えたり、焦点を変えたりすることで映り込みに何とか対処しているが、必ずしも適切な視点や焦点がとれるとは限らない。カメラを用いて画像の取り込みをする場合も同様である。カメラの場合は、人間のように意図的に見たいものを選択できないので、問題はより深刻である。ガラスの環境下におけるロボットの進路の確保やテレビカメラ画像の鮮明化、さらには、映り込みにより視野外や障害物背後の物体の検出も可能であり、その利用範囲の広さから、ガラスの存在する環境下での実像と映り込みの分離は、極めて重要である[1][2]。

本研究では、ガラスに映り込んだ物体とガラスの背後にある実物体とを分離する手法を提案する。本研究に関連する研究は次のとおりである。

Wolfら[3]-[5]は、偏光反射モデルを用いて反射成分を分離し、液晶の偏光カメラを開発した。山田ら[6]は、鏡面反射成分を取り除く液晶視覚システムを開発し、自律ロボットの道路の白線抽出に役立っている。上田ら[7]は、偏光を濡れた路面の検出に利用した。これらの研究は、偏光の方向が既知で不透明物体を対象としている。

一般に、ガラスの表面で反射する光は、ガラスを透過してくる光よりも強く偏光しているため、偏光フィルタを適切な角度（偏光角）で用いることにより、映り込み物体を除去することができる。しかし、偏光角は、ガラス及び映り込みを生じさせる物体のカメラに対する位置と姿勢により求めることができるが、これは容易でない。

そこで本研究では、偏光フィルタを少しずつ回転させながら取り込んだ複数枚の画像から各画素の最大値・最小値を求めることにより、実物体と映り込み物体の分離を行う。この方法の利点は、画像間の比較・差分といった比較的簡単な処理で分離でき

物体の位置・方向・形に依存しないところにある。

2 反射光・透過光の偏光度

いま、屈折率 n_1 の媒質1から屈折率 n_2 の媒質2への反射（図1参照）を考える。

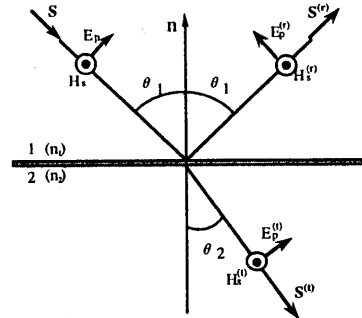


図1 反射・透過

図1で、 θ_1 は入射角、 θ_2 は屈折角、 S は入射光（電気ベクトル）、 n は表面の法線である。Snellの法則により

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

が成り立つ。

電気ベクトルの入射面紙面に対する垂直な成分を R_s 、入射面紙面に対する平行な成分を R_p とするとFresnelの反射係数により

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ R_p &= \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

つぎに、屈折率 n_1 の媒質1から屈折率 n_2 の媒質2への透過（図1）を考える。電気ベクトルの入射面に対する垂直な成分を T_s 、入射面に対する平行な成分を T_p とするとFresnelの透過係数により

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \sin^2(\theta_1 - \theta_2)} \\ T_p &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

さらに、屈折率 n_2 の媒質2から屈折率 n_1 の媒質1への透過（図1）を考える。 n_2 の媒質から n_1 の媒質へ

の屈折角は入射角が θ_2 ならば、Snellの法則により容易に θ_1 に等しいことがわかる。電気ベクトルの入射面に対する垂直な成分を T_s' 、入射面に対する平行な成分を T_p' とすると

$$T_s' = \frac{\sin 2\theta_2 \sin 2\theta_1}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1) \sin^2(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$T_p' = \frac{\sin 2\theta_2 \sin 2\theta_1}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)}$$
(4)

となる。

さらに、屈折率 n_1 の媒質1から屈折率 n_2 の媒質2を通り、再び屈折率 n_1 の媒質1に透過する光の透過率 T_s'' 、 T_p'' は

$$T_s'' = T_s T_s' = T_s'^2$$

$$T_p'' = T_p T_p' = T_p'^2$$
(5)

となる。

図2は、式(2)と式(5)の反射率と透過率を示したもので、入射角が30度から80度では R_p は R_s よりずっと小さい。このように反射光は偏光し、入射面に平行な成分はかなり小さい。入射角が70度より小さい場合、透過光はほとんど偏光しない。

図3は、式(2) (反射光)のs成分とp成分の強度比と式(5) (透過光)のs成分とp成分の強度比を表わし、入射角が30度から70度では、反射光の強度比が透過光の強度比よりずっと大きいので、この範囲では、透過光の偏光を無視することができる。

以上のように、反射光は、入射角が30度から70度では偏光度が大きいが、透過光は、この範囲では偏光度が小さい。

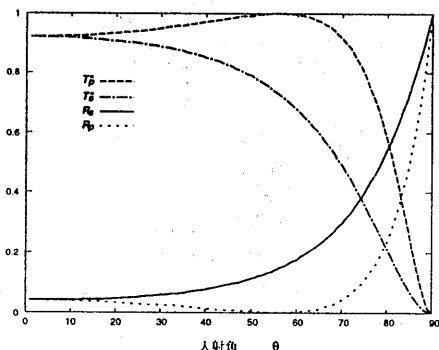


図2 反射率 (R) と透過率 (T)

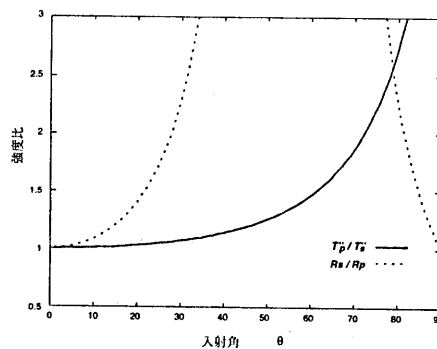


図3 s成分とp成分の強度比

3 分離方法

前節で述べたように反射光は偏光するが、透過光はほとんど偏光しない。ここでは、この物理的な特性に基づいて、画像生成モデルを示し、このモデルを用いることで、ガラスに映り込んだ物体とガラスの背後にある物体を分離する方法を述べる。

3.1 画像生成モデル

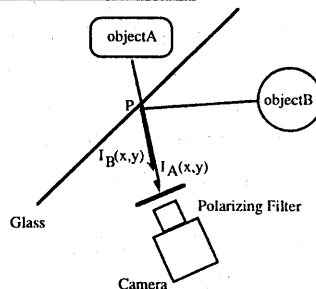


図4 画像生成モデルの構成

図4において、ガラス面上の点Pの輝度を $I(x, y)$ とし、カメラと同じ側にある物体Bの輝度がガラス面上の点Pで反射光によるカメラ輝度を $I_B(x, y)$ とし、ガラスに対してカメラと反対側にある物体Aからの光がガラス面上の点Pを透過するカメラ輝度を $I_A(x, y)$ とする。このとき、 $I(x, y)$ 、 $I_A(x, y)$ 、 $I_B(x, y)$ には

$$I(x, y) = I_A(x, y) + I_B(x, y)$$
(6)

という関係がある。

太陽や白熱灯のような一般の光源は、非偏光である。本論文では、ガラス以外の物体表面での反射における偏光は無視できるほど小さいとする。つまり、物体Aおよび物体Bの表面の反射は、非偏光である

とする。そして、カメラと同じ側にある物体Bがガラス面で反射する場合にのみ偏光するとする。そうすると、CCDカメラに装着された偏光フィルターを使用することで偏光成分を含む $I_B(x,y)$ を取り除くことができ、その結果、偏光成分を含まない $I_A(x,y)$ を分離することができる。

偏光フィルタの回転角度を θ とすると式(6)は

$$I(x,y;\theta) = I_A(x,y;\theta) + I_B(x,y;\theta) \quad (7)$$
と書き直せる。

2節で述べたように、透過輝度 $I_A(x,y)$ はほとんど偏光しないので、偏光フィルタの回転角度 θ に依存しないと考えるとよい。すなわち、

$$I_A(x,y;\theta) \cong I_A(x,y) \quad (8)$$

そうすると式(7)は

$$I(x,y;\theta) = I_A(x,y) + I_B(x,y;\theta) \quad (9)$$

となる。ここで、 $I_B(x,y;\theta)$ は偏光しているので、 θ をうまく設定すれば式(9)において、 $I_B(x,y;\theta) \cong 0$ となる。

3.2 画像の分離方法

偏光角は、物体とガラスとカメラの間の位置と姿勢により決定される。しかし、このような3つの位置関係を測定するのは困難で現実的でない。また、偏光角はガラス面の場所によって異なる。特に、曲面ガラスの場合は顕著である。そこで、我々はCCDカメラに偏光フィルターを装着し、フィルターを適当なきざみ角度で180度回転させて取り込んだ複数の画像を用いる。

実物体Aのみが存在する画像(すなわち、映り込みが除去された画像) $\hat{I}_A(x,y)$ は、各々の画素について $I(x,y;\theta)$ の最小値をとることで得られる。つまり

$$\hat{I}_A(x,y) = \min_{\theta \in \Theta} I(x,y;\theta) \quad (10)$$

となる。ここで、 Θ は画像を取り込んだ時のフィルタの角度の集合とする。

各々の画素について $I(x,y;\theta)$ の最大値をとった画像を

$$I_{MAX}(x,y) = \max_{\theta \in \Theta} I(x,y;\theta) \quad (11)$$

とすると、これは、全く映り込みがとれていない画像を表わし、

$$I_{MAX}(x,y) = \hat{I}_A(x,y) + \hat{I}_B(x,y) \quad (12)$$

であるので、実物体Bの映り込み画像は

$$\hat{I}_B(x,y) = I_{MAX}(x,y) - \hat{I}_A(x,y) \quad (13)$$

で得られる。

4 試作システム

前節の考えの有効性を確かめるために、システムを作成し暗室と屋外で実験を行った。

4.1 システム構成

作成したシステムの構成を図5に示す。システムは、CCDカメラの前に円偏光型フィルターを装着し、フィルターを回転させる度にワークステーションに画像を送り、その画像を処理してゆく簡単なものである。

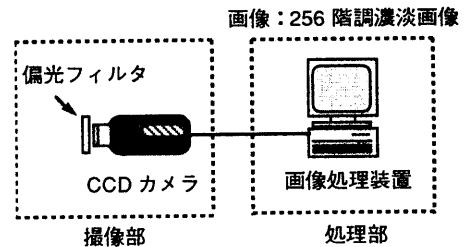


図5 システムの構成

4.2 設置条件

図6のように、暗室では、1枚のガラスを設置し、ガラスに対してカメラと同じ側に2つのボールを置き、ガラスに対してカメラと反対側に1つのボールを置いた。カメラの光軸とガラスの法線のなす角は56度であった。照明は、白色蛍光灯(15w)を2本使用した。

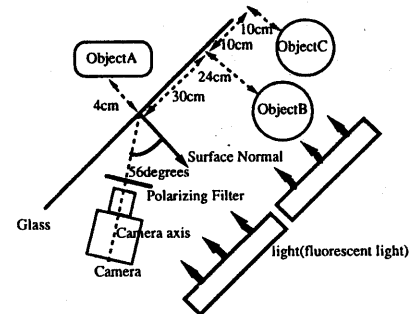


図6 設置条件(暗室)

図7のように、屋外は、建物の入り口の窓ガラスで行った。入り口の手前にあるタイル張りの壁と自転車がガラスに対してカメラと同じ側にあり、入り口の奥にあるタイル張りの壁とパネルと消火栓がガラスに対してカメラと反対側にある。カメラの

光軸とガラスの法線のなす角は54度であった。

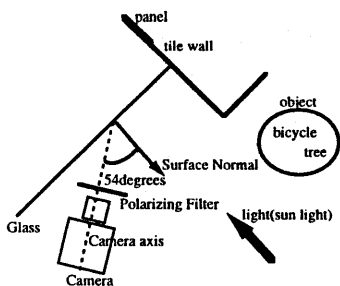


図7 設置条件 (屋外)

4.3 実験

CCDカメラの前に装着した偏光フィルタを回転し、CCDカメラの絞りを固定して画像を取り込む。対称性を考えて、偏光フィルタを0度～180度までの10度間隔で回転させ、画像(640×480pixelsの濃淡画像)を18枚取り込んだ。採取した画像に対して式(10)と式(13)を用いて、ガラスの背後にある実物体の画像とガラスに映り込んだ画像を分離する。暗室の場合の画像を図8に示し、屋外の場合の画像を図9に示す。これらの図8、図9はいずれも左から右へ10度毎に偏光フィルタを回転させて取り込まれた画像である。

4.4 実験結果

暗室の場合のガラスの背後にある実物体の画像とガラスに映り込んだ画像を図10に示す。図10(a)は、映り込みが取り除かれた実物体画像で、図10(b)は、映り込み画像である。また、屋外の場合のガラスの背後にある実物体の画像とガラスに映り込んだ画像を図11に示す。図11(a)は、映り込みが取り除かれた実物体画像で、図11(b)は、映り込み画像である。

暗室の場合、どのボールが映り込んでいるのか、またどのボールが実際のボールかわからないが、この手法により、ガラスの背後にある実物体(図10(a))とガラスに映り込んだ物体(図10(b))を分離することができ、ガラスの背後に1つボールが存在し、ガラスの前面に2つのボールが存在していることがわかる。

屋外の場合も、窓ガラスに自転車や木などが映り込んでいて、窓ガラスの向こう側に何があるのかわからないが、この手法により、ガラスの背後にある実物体(図11(a))とガラスに映り込んだ物体(図11(b))を分離することができ、窓ガラスの背後に

パネルや消化栓が存在し、窓ガラスの前面にタイル張りの壁(ガラス背後のタイル張りの壁と同じ模様)や自転車や木が存在していることがわかる。

5 まとめ

本論文では、ガラスに映り込んだ物体とガラスの背後にある実物体を分離する方法を示した。

この方法は、偏光という光学的な特性を利用し、物体の位置・方向・形の情報は必要としない。さらに、画素の比較と差分という非常に簡単な計算により実行が可能である。したがって、リアルタイムで分離が可能なハードウェアが実現可能だと思われる。

6 参考文献

- [1]熊木, 大西: 実物体と映り込みとの区別の方法, 平成6年度電気関係学会東海支部連合大会, p.368(1994.10)
- [2]熊木, 山村, 大西: 実物体と映り込みとの区別の方法, 電子情報通信学会総合大会, D-615, (1995.03)
- [3]L.B.Wolf: Using Polarization to Separate Reflection Components, Proc.IEEE Computer Society Conf.CVPR'89, pp.363-369(1989)
- [4]L.B.Wolf and T.E.Boult: Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model, IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, pp.635-657(1991)
- [5]L.B.Wolf and T.A.Mancini: Liquid Crystal Polarization Camera, Proc.of IEEE Workshop on Application of Computer Vision, pp.120-126(1992.12)
- [6]山田, 中野, 山本: 液晶を用いた光沢除去のための視覚システム, 電学論C, Vol.113-C, No.12, pp.1087-1093(1993)
- [7]上田, 堀場, 池谷, 大井: 画像処理を用いた路面湿潤状況検出方式, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.6, pp.1072-1080(1994)

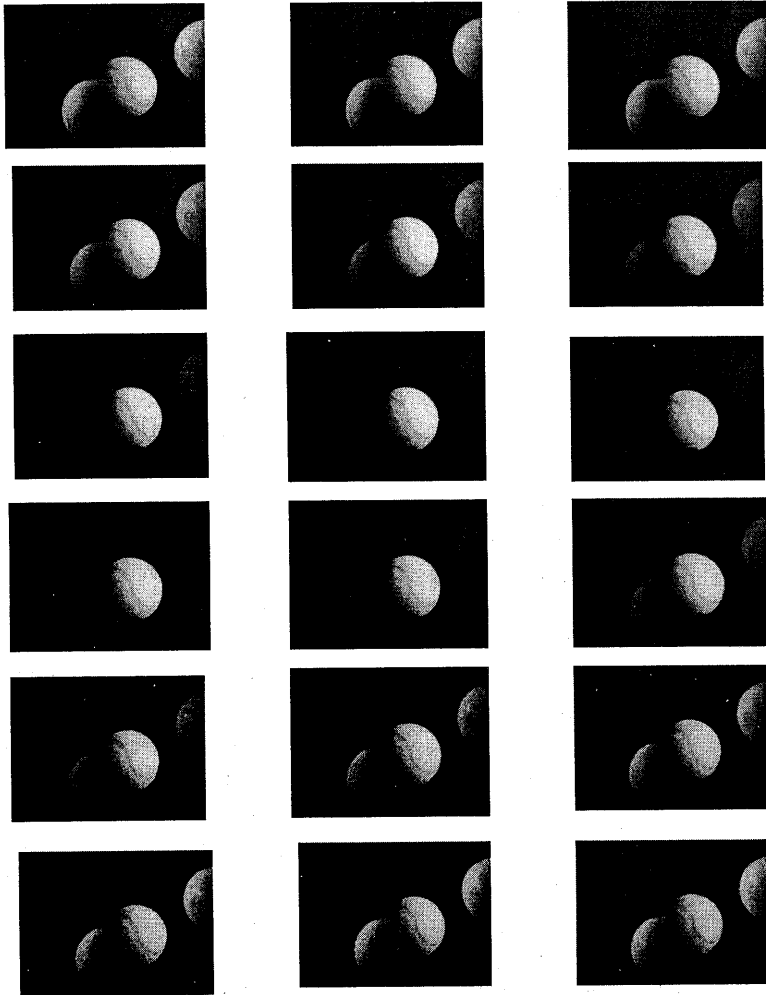


図8 偏光フィルターを回転させることにより取り込まれた画像（左から右へ10度毎）

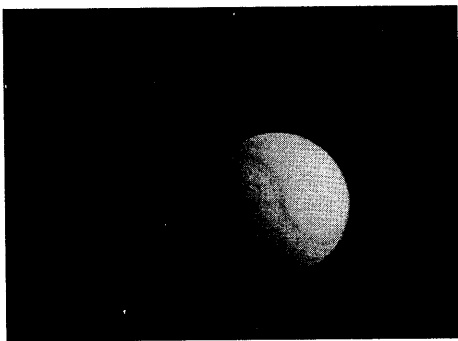


図10(a) 実物体画像

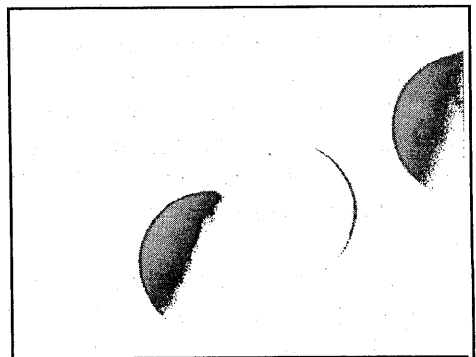


図10(b) 映り込み画像

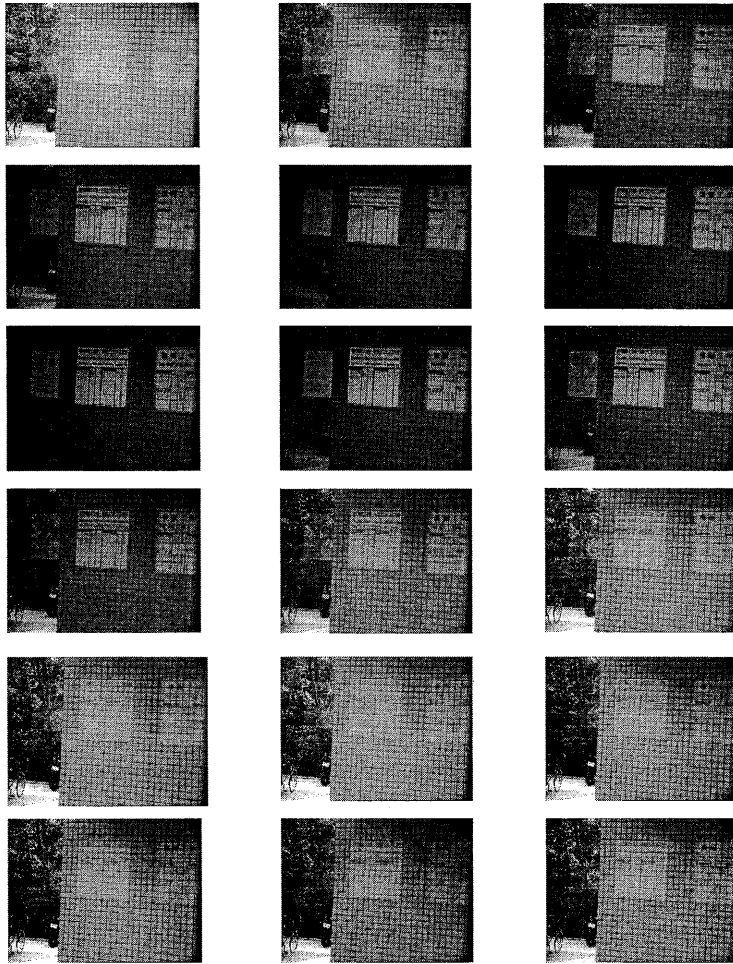


図9 偏光フィルターを回転させることにより取り込まれた画像（左から右へ10度毎）

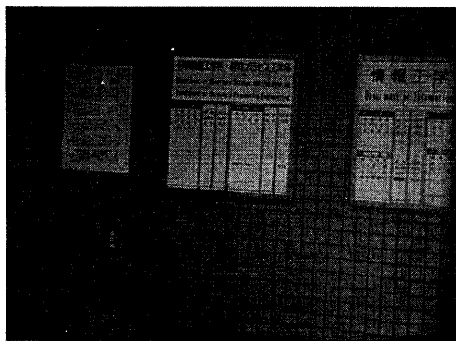


図11(a) 実物体画像

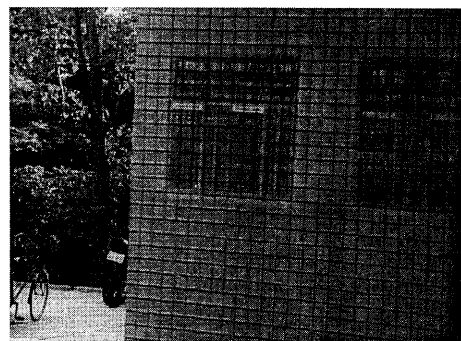


図11(b) 映り込み画像