

マシンビジョンにおける画像センシングと
その自動車産業への応用に関する研究

山 田 啓 一

マシンビジョンにおける画像センシングと
その自動車産業への応用に関する研究

名古屋大学図書	
和	1253568

1996年

山 田 啓 一

目次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	産業におけるマシンビジョンとその問題	1
1.1.2	マシンビジョンにおける画像センシング	3
1.1.3	画像センシングの問題と従来の研究	4
1.2	研究の目的	9
1.3	研究の概要	9
2	光沢の影響を受けない画像センシング方式	11
2.1	緒言	11
2.2	偏光を用いた表面反射成分と内部反射成分の分離	12
2.3	平面对象物の光沢成分除去	15
2.3.1	光沢除去の方法	15
2.3.2	検証実験	18
2.4	結言	21
3	屋内自律走行車のための視覚システム	23
3.1	緒言	23
3.2	屋内自律走行車	24
3.3	光沢の影響を受けない視覚システム	26
3.3.1	液晶を利用した視覚システムの実現方法	26
3.3.2	視覚システムの構成	26
3.3.3	光沢除去性能	29
3.4	屋内自律走行車の視覚としての有効性	32
3.4.1	実験方法	32
3.4.2	実験結果	34

3.5	結言	34
4	ダイナミックレンジの広い画像センシング方式	37
4.1	緒言	37
4.2	露光条件の異なる撮像画像の合成によるダイナミックレンジの拡大	38
4.3	ダイナミックレンジ拡大画像の合成方法	40
4.3.1	画像合成アルゴリズム	40
4.3.2	アルゴリズムの検証実験	43
4.4	結言	45
5	屋外走行環境認識のための視覚システム	49
5.1	緒言	49
5.2	屋外走行環境認識に必要なダイナミックレンジ	50
5.3	広いダイナミックレンジを持つ視覚システム	50
5.3.1	露光条件の異なる画像の撮像方法	50
5.3.2	視覚システムの構成	52
5.3.3	ダイナミックレンジ	54
5.3.4	その他の性能	55
5.4	自動車の走行環境認識のための視覚システムとしての有効性	56
5.4.1	実験方法	56
5.4.2	実験結果	57
5.4.3	ダイナミックレンジ拡大の効果の考察	59
5.5	結言	64
6	部品位置決め視覚システム	65
6.1	緒言	65
6.2	部品位置決め視覚システム	66
6.2.1	工場における照明環境の変動	66
6.2.2	位置決めの対象部品	67
6.2.3	位置決め視覚システムの構成	67
6.2.4	丸穴の認識アルゴリズム	69
6.3	位置決め視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性	69
6.3.1	実験方法	70
6.3.2	実験結果	72
6.3.3	照明環境の変動に対するロバスト性	75

目次	iii
6.4 結言	78
7 輝度比符号化光源による鏡面の角度計測	81
7.1 緒言	81
7.2 計測方式	83
7.2.1 正反射光による鏡面の角度検出の原理	83
7.2.2 輝度比符号化法	83
7.3 はんだ接触角計測への適用	88
7.3.1 計測対象	88
7.3.2 計測システムの構成	90
7.3.3 計測システムの性能評価	94
7.3.4 溶融はんだ接触角の計測	99
7.4 結言	100
8 結論	103
8.1 本研究の成果	103
8.2 今後の課題	105
付録	107
参考文献	109
本研究に関する発表論文	115
謝辞	117

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 産業におけるマシンビジョンとその問題

人間の視覚は外界である 3 次元世界の大量の情報を非接触で高速に取り込むことができる強力な手段であり，人間は情報の 80% ないし 90% を視覚によって受容しているといわれる [1] [2]．人間だけでなく，機械が外界の情報を取り込むための手段としても，視覚は極めて強力であると考えられている．機械に人工の視覚を与えるための研究分野として，コンピュータビジョンおよびマシンビジョン (ロボットビジョン) [3] がある．両者は明瞭に区別されているわけではないが，基礎的で科学的なアプローチの研究分野をコンピュータビジョン，応用的で工学的アプローチの研究分野をマシンビジョンとよぶのが一般的である．

マシンビジョンの目的は，物体の形，大きさ，位置，姿勢といった幾何学的な情報の認識，傷，汚れ，欠陥，色合いといった質的な情報の認識，および文字や記号といった人為的に付加された情報の認識である [4]．マシンビジョンの応用が考えられる分野は極めて広く，FA，自動車，交通システム，セキュリティ，OA，通信，医療，福祉などが挙げられる．これらのうち自動車の分野だけをみても，その応用先は図 1.1 に示すように多岐に渡る．特に近年では，従来の生産工程への応用に加え，自動車の安全や交通システムなどへの応用が期待されている [6]．このように，現代社会においてマシンビジョンに寄せられる期待は大きい．

マシンビジョンの基礎的な研究は，いわゆる積木の世界を対象として，1960 年代初めに米国で始まった [7]．1970 年代に入ると，積木のような架空の対象ではなく実用化を目指すようになり，現実の世界を対象とした研究が盛んになった．1970 年代前半にはプリント基板の傷検査が先駆的に開発され，マシンビジョンが産業分野で初め

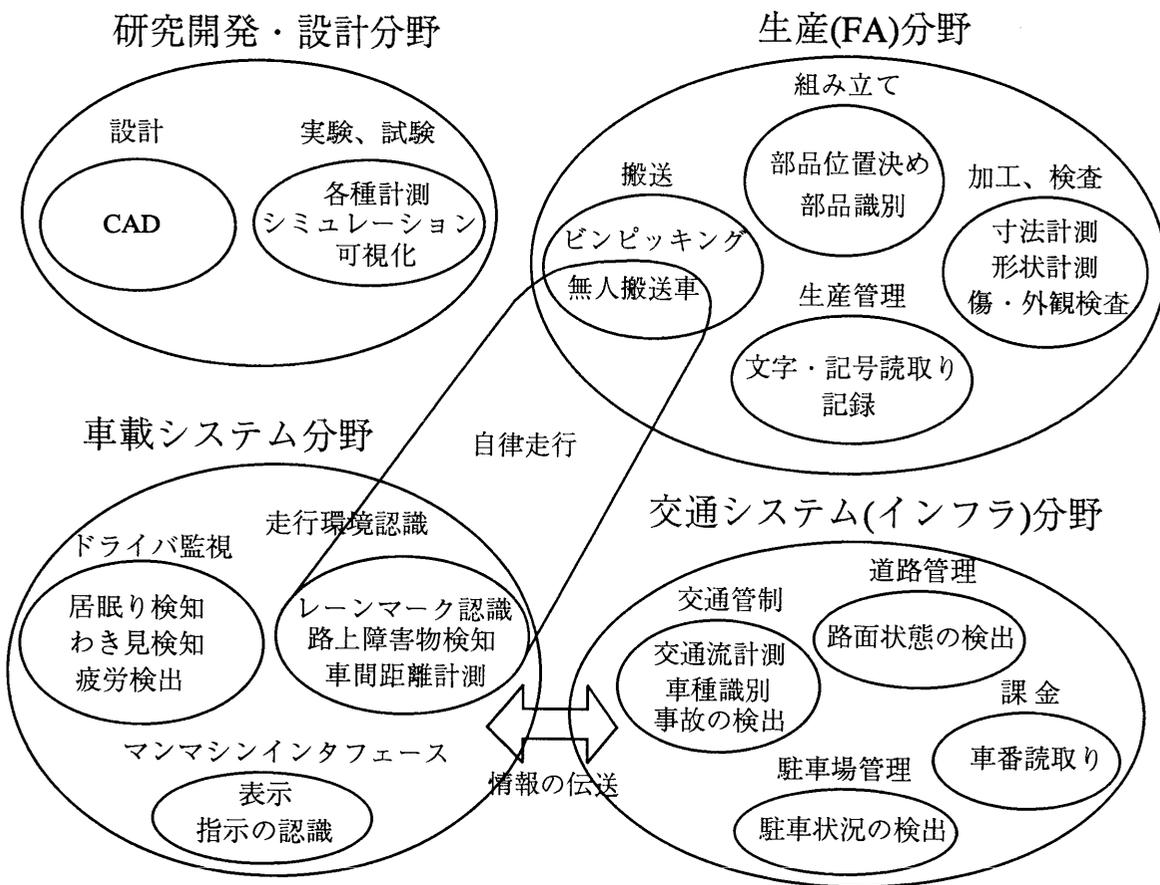


図 1.1 自動車産業におけるマシンビジョンの応用

て実用化された [8]. 1970 年代後半になると, LSI 技術の急速な進歩により, 高性能なビジョンが比較的低価格で実現できるようになり, 実用例も多くなってきた. 1980 年代になると, マイクロコンピュータの高性能化と低価格化により, マシンビジョンの本格的な実用期に入った. そして, 1980 年代中ごろまでに, 主に 2 次元マシンビジョン (光切断法のように 3 次元を 2 次元問題に縮退させる場合も含む) が, 生産工程を中心に産業分野に急速に普及した. 現在では, さらに高度な視覚機能の実現を目指し, 3 次元マシンビジョンの各種の手法やそのインプリメント方法などの研究が行われている.

このようにマシンビジョンはすでに実用期に入ったが, 産業分野で実用されている比較的単純な機能のものについても, 必ずしも満足のできるものとはいえない. その共通的問題として, 現在のマシンビジョンは, 一般の環境下で任意の対象や情景を認識することが極めて難しく, 適用できる環境条件に大きな制限があることが挙げられる. 現状では, マシンビジョンを正しく動作させるためには, 照明環境を整備, 調整することはほぼ必須であり, 自動車の走行環境認識のように照明環境を整えることができない屋外の環境下で, マシンビジョンを安定して動作させることは非常に難しい. また, 工場の生産工程にマシンビジョンを導入する上で, 照明環境の整備と調整自体に多くの労力と費用を要している. さらに, 対象物が, 工業製品などによくあるような, 光沢のあるプラスチックや著しい正反射をする鏡面をもつ金属などの場合には, 照明環境の影響をより強く受けるため, 光を拡散的に反射する物体に比べてさらに取り扱うことが難しくなっている. このような照明環境の制限は, マシンビジョンの手法のほとんどが汎用的なものではなく, 個別対応的な技術となっていることにも結び付いていると考えられる.

以上のように, マシンビジョンの研究として, さらに複雑な対象物を対象とする方向とともに, 照明環境の変動に強くする方向が重要であると考えられる.

1.1.2 マシンビジョンにおける画像センシング

マシンビジョンの動作は, 図 1.2 に示したように, 大きくは 2 つのステップから構成される. 1 つは外界の情報を視覚により入力するセンシング, もう 1 つは入力された情報から所望の結果を得るための認識処理である. 視覚を通して入力される情報は, 普通, 画像の形式をとる. センシングに望まれる役割は, 所望の結果を得るのに必要となる外界の情報を, 十分な品質で欠落なくとらえることである. 一方, 認識処理の役割は, センシングによって得られた情報から所望の結果を信頼性良く得ることである.

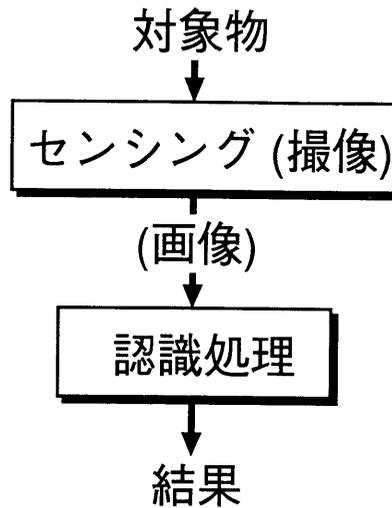


図 1.2 マシンビジョンにおけるセンシングと認識処理

マシンビジョンが適用できる照明環境や対象物に大きな制限がある原因には、照明環境が変動したときにセンシングで得られる情報が欠落したり品質が悪化したりすることと、認識処理のアルゴリズムが照明環境の変動に弱いことが挙げられる。すなわち、センシングの段階で多くの情報が欠落してしまうと、認識処理でそれを推定して信頼性良い認識結果を得ることは難しくなる。また、認識処理のアルゴリズムが照明環境に依存していると、照明環境が変動した場合には正しい結果が得られなくなる。

従来、照明環境の変動に強いマシンビジョンを実現することを目的として、照明環境に依存しない認識処理アルゴリズムの研究が行われている [53] [57] [54]。しかし、たとえ認識処理が照明環境に依存しないものであっても、センシングの段階で情報が欠落したりした場合には、良好な結果を期待することはできない。そこで照明環境の変動に強いセンシングが望まれるが、このような観点からの研究はこれまでほとんどなされていない。

1.1.3 画像センシングの問題と従来の研究

視覚を用いて対象物の情報を画像としてセンシング (撮像) するとき、視覚への入力、図 1.3 に示したように、照明光が対象物により反射された光である。その光強度の位置的分布が、画像の明るさ分布となる。対象物による光の反射は、図 1.4 に示すように、正反射と拡散反射の 2 種類に分類される [10]。正反射とは、対象物の表面が波長に比べて滑らかであるときに、入射面と反射面が一致し、かつ、入射角と反射角

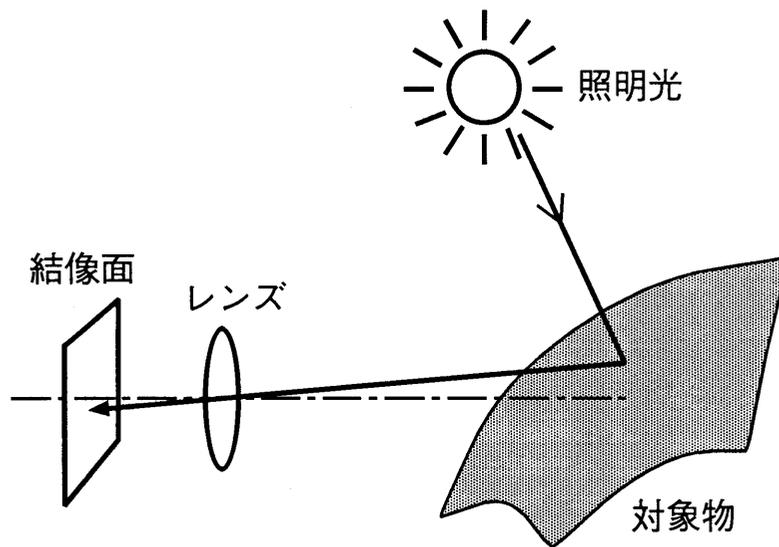


図 1.3 画像のセンシング (撮像)

が等しくなる反射のことで、鏡面反射ともよばれる。一方、拡散反射とは、光が、巨視的にみて、正反射の方向だけでなく、多くの方向に拡散される反射のことで、乱反射ともよばれる [11]。反射光が Lambert の余弦法則に従う拡散性がよい面を、均等拡散面とよび、反射率が1である理想的な均等拡散面を、完全拡散反射面とよぶ [12]。基本的には、正反射は、滑らかな表面をもつ誘電体および金属の表面により生じる。また、拡散反射は、粗い表面をもつ誘電体や金属の表面、および誘電体の内部により生じる。後者では、内部に含まれる色素等の散乱体に強い配向があったり、物体内部が層構造を成している場合には、さらに複雑な反射を生じるが、本論文ではこのような場合は扱わない。

対象物に入射した光は、図 1.5 のように、光の一部は表面で正反射し、残りは表面から屈折して内部に侵入する。対象物が、滑らかな表面をもつ誘電体の場合、表面から内部に侵入した光は、一般に図 1.6 に示されるように、誘電体内部に含まれる色素などと相互作用し、一部は吸収され、一部はいろいろな方向に何度か反射されて再び表面から出て拡散反射光となる。この光を、物体の内部で反射された光という意味で、内部反射光とよぶ。また、全反射光のうちの内部反射による成分を、内部反射成分とよぶ。一方、誘電体の表面による正反射は、つやのあるプラスチックのような光沢のもととなる。この光を、物体の表面で反射された光という意味で、表面反射光と呼び、全反射光のうちの表面反射による成分を、表面反射成分とよぶ。

対象物が金属の場合には、一般にその屈折率がある波長で大きな虚数部を持つので、入射光の一部の波長は内部に侵入して強く吸収され、それ以外は表面で強く反射される。従って、滑らかな表面をもつ金属では、光は正反射される。誘電体および金属のいずれの場合も、図 1.7 のように対象物の表面が滑らかではなく粗い状態である場合には、入射光は表面によりいろいろな方向に反射されて、その反射はマクロ的に見て拡散反射になる。

対象物からの反射光は、このような正反射光と拡散反射光が重ね合わされたものとなる。正反射光の強度は、照明光の位置、対象物の面の方向および視点の位置が変化したとき、それらが正反射の位置関係になっているか否かによって、著しく変化する。一方、拡散反射光の強度は、これらの位置関係が変化しても、急には変化しない。

マシンビジョンが照明環境の変動に弱い原因は、画像のセンシングの観点から、以下のように考えられる。照明環境の変動としては、照明光の対象物に対する相対的位置関係の変化と、照明光の強度の変化とが挙げられる。

マシンビジョンが必要とする情報は、その目的によって、対象物からの正反射光に含まれる場合と拡散反射光に含まれる場合とがある。対象物が誘電体の場合、その

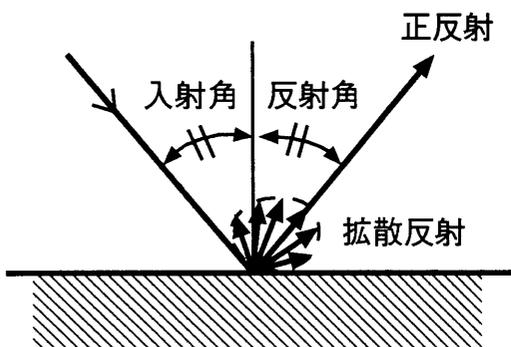


図 1.4 正反射と拡散反射

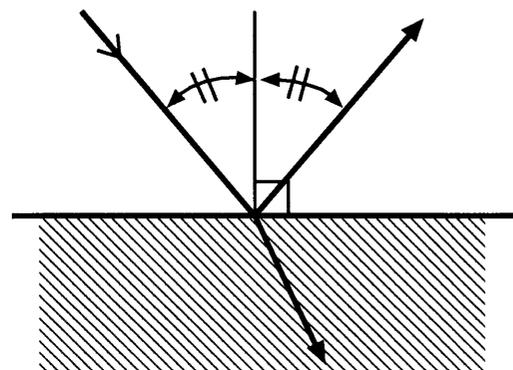


図 1.5 光の反射と屈折

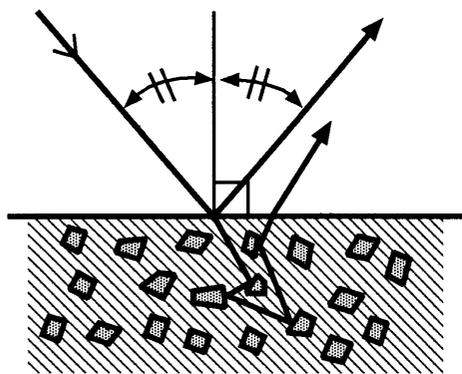


図 1.6 誘電体の内部反射による拡散反射

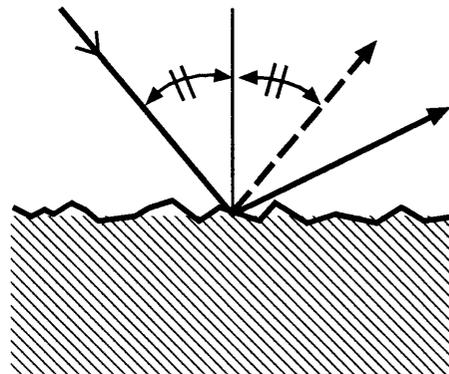


図 1.7 粗い表面による拡散反射 (金属および誘電体)

色や濃淡の情報は、通常、表面から内部に侵入した光の吸収に起因するものである。内部で散乱されて再び表面に出てくる内部反射成分に含まれる。この場合に、対象物が表面反射の性質が強い物体であると、表面反射成分は対象物の情報に対する雑音となる。先に述べたように、このような物体では、照明光の位置の変化によって、正反射光の強さが大きく変化する。そのとき、センシングされた画像の雑音成分も大きく変化し、得たい情報の認識処理が極めて困難になる。この問題を画像センシングの段階で解決するためには、対象物からの反射光を、表面による正反射光と内部による拡散反射光の2つの成分に分けることが必要であると考えられる。

対象物が正反射の性質が弱い物体であっても、照明環境が変動すると問題が生じる。拡散反射光の強さは入射光の強度に比例するので、照明光の強度が例えば屋外環境のように大きく変化すると、それに伴って反射光の強さも大きく変化することになる。画像のセンシングに用いられるテレビカメラは、ある明るさ以上になるとその出力が飽和する。出力が飽和することなくセンシングできる明るさの範囲を、ダイナミックレンジとよぶ。テレビカメラのダイナミックレンジは、その出力が飽和する明るさと雑音レベルに相当する明るさの比で定義される。従来のテレビカメラのダイナミックレンジは500程度である。さらに、このダイナミックレンジの内、認識処理で有効に利用できる S/N が比較的良いレンジは、一般にこれより1桁ほど狭い。このような従来のテレビカメラを画像のセンシングに用いた場合、照明環境が大きく変動する条件下では、情報が欠落して認識処理が困難になる問題が発生する。この問題の解決のためには、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大し、センシング段階での情報の欠落を防止することが必要であると考えられる。

誘電体による反射光を、正反射光である表面反射成分と拡散反射光である内部反射成分とに分離する方法には、反射光の色を利用する方法と、偏光を利用する方法がある。前者として、対象物を色素を内部に含む2色性物体と考え、反射光のRGB空間での色ベクトルの分布から表面反射成分を分離する方法が、Shaferらにより報告されている [13]。この方法は、コンピュータグラフィックスのためのカラー情報の取得を主目的としたもので、色ベクトル分布の認識処理が必要なため、主にモノクロ画像が用いられるマシンビジョンのための画像センシング手段として利用することは難しい。一方、後者として、反射光の p および s 偏光成分の分布状況から表面反射成分と内部反射成分の大きさを求める方法が、Wolffらにより報告されている [14]。この研究では、対象物の材質の判別(金属か誘電体か)などへの応用が示されている。しかし、この方法は、画像の画素ごとにはなく、画像のある領域について反射光の偏光状態の分布を調べるものであるため、マシンビジョンのための、光沢の影響を受けない画

像センシング手段として用いることは難しい。

テレビカメラのダイナミックレンジを拡大する方法としては、テレビカメラの撮像素子の特性を改良する方法 [22] [23] [24] [25] [26] と、従来の撮像素子を用いて撮像した複数の画像を合成する方法 [27] [28] [29] [30] [31] とが報告されている。前者は、画素ごとの特性を揃えることが難しいことや発熱量の問題などのため、標準的カメラに使われるエリアセンサの画素数である 30 万ないし 40 万画素の撮像素子は研究段階である。後者は、主に、精度良い色彩情報の入力を目的とした基礎検討的なもので、テレビカメラの明るさのダイナミックレンジ拡大という観点からは十分な検討はなされていない。これらの他、撮像素子を冷却することにより雑音を減少させてダイナミックレンジを広げる、冷却型 CCD カメラがあるが、マシンビジョンへの適用には、画像の読みだし速度などの点で課題がある。

1.2 研究の目的

以上のような背景から、本研究は、新しい画像センシング法の開発によって、照明環境の変動に強いマシンビジョンを実現することを目的としている。

本研究で解決しようとする問題は、産業分野での実際の問題としての割合が大きい、対象物がもつ光沢のために認識処理が難しくなる問題と、照明環境の変動によって画像のセンシング時にセンサの出力が飽和するために認識処理が難しくなる問題である。前者を解決するために、反射光のうちの光沢成分を分離、除去した画像をセンシングする方法を開発する。また、後者を解決するために、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大して画像をセンシングする方法を開発する。さらに、開発したこれらの画像センシング法を、自動車産業における実際の問題である、屋内用自律走行車や自動車の走行環境認識、生産工程のロボット視覚および金属鏡面の角度計測に応用する。

1.3 研究の概要

本論文は、上に述べたマシンビジョンのための新しい画像センシング法とその応用についての研究結果をまとめたもので、以下の 6 章から構成される。

第 2 章および第 3 章では、第 1 番目の問題として、光沢のある物体を対象とした画像センシング法とその応用を扱う。まず第 2 章では、画像センシング法として、光沢のあるプラスチックなどの物体の画像センシングを目的に、誘電体でできた物体からの反射光を、表面反射率の差を用いて表面反射成分と内部反射成分とに分離する方法を

提案する。次に第3章では、第2章で示した方法を自律走行車の視覚に応用する。ここでは、自律走行車が光沢のある廊下においても走行できるようにするために、第2章で示した方式によって光沢成分を除去した画像を得る、自律走行車用の視覚システムを提案する。そして、試作した視覚システムを用いた実験により、本方法が有効であることを示す。

第4章から第7章では、第2番目の問題として、照明環境が整備されていなくとも情報を欠落させることなく画像をセンシングできるような、明るさのダイナミックレンジが広い画像センシング法とその応用を扱う。まず第4章では、画像センシング法として、露光条件の異なる画像の合成によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大する方式を提案する。第5章では、その応用の1つとして、照明環境が本来整備できない、自動車の屋外走行環境認識への適用について述べる。まず、モノクロテレビカメラのダイナミックレンジを第4章の方式によって拡大する具体的な実現方式について検討し、その方式に基づいて視覚システムを試作する。そして、高速道路での車載実験によって、この視覚システムのダイナミックレンジ拡大の効果と残された課題を明らかにする。第6章では、別の応用として、照明環境の整備を不要にすることを目的とした、生産工程のロボット視覚への適用について述べる。工場での照明環境の変動に影響されることなく、安定に動作する位置決め視覚システムを実現するために、照明環境が変動しても画像情報の欠落が生じないように、視覚システムへの画像入力に、第5章で試作したダイナミックレンジを拡大したテレビカメラを用いる。そして、評価実験により、本位置決め視覚システムの有効性を確認し、テレビカメラのダイナミックレンジ拡大が、ロボット視覚の照明環境の変動に対するロバスト性（頑健性）の向上に極めて有効であることを明らかにする。第7章では、第4章で示した明るさのダイナミックレンジの広い画像センシング技術の別な応用として、照明環境の変動に反射光が強い影響を受ける、著しい正反射特性をもつ金属鏡面の計測について述べる。まず、ダイナミックレンジの広い画像センシング法を用いた、計測精度と速度を合わせ持った、鏡面の角度の計測方式を提案する。そして、本方式を、はんだの濡れ性の評価を目的とした、熔融状態のはんだの接触角の計測に適用し、提案する計測方式が有効であることを示す。

最後に、第8章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。

第 2 章

光沢の影響を受けない画像センシング方式

2.1 緒言

我々の身のまわりには，光沢のあるプラスチックなどの物体が数多く存在する．表面が滑らかなプラスチックなどからの反射光は表面反射成分と内部反射成分とに分けられ，光沢の原因は反射光の表面反射成分である（図 2.1）．光沢のある物体の表面の文字や模様および物体本来の色を認識する上では，内部反射成分にその情報が含まれているので，表面反射成分は雑音となる．従って，反射光を表面反射成分と内部反射成分とに分離できれば，雑音となる光沢を含まない画像を得ることができ，対象物自体の情報の認識が可能になる．

反射光がブリュースター角で反射している場合に限れば，反射光に含まれる表面反射成分は完全に偏光するので，偏光板を通して対象物を撮像することで光沢を除去した画像が得られる．しかし，画像センシングにブリュースター角の条件を満たすという制限を課すとその用途が限られることになるので，反射角度に依存することなく成

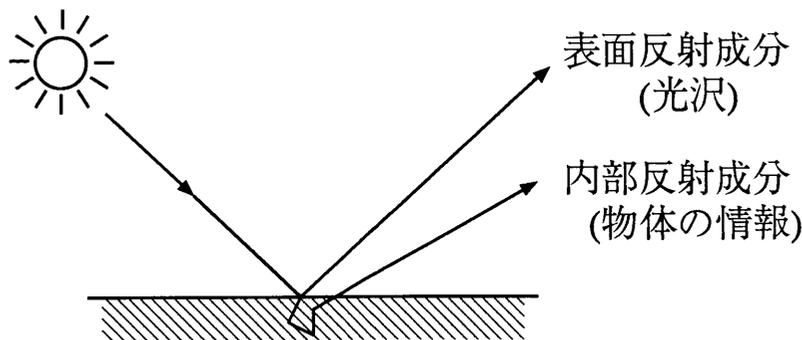


図 2.1 表面が滑らかなプラスチック (誘電体) からの反射光

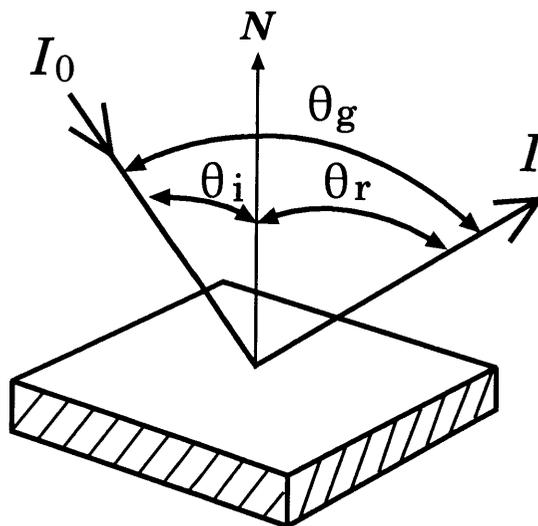


図 2.2 入射角 θ_i , 反射角 θ_r , および位相角 θ_g

分分離が可能な方法が望まれる。

本章では，光沢のある対象物の画像センシングを目的に，プラスチックなど誘電体でできた物体からの反射光を，表面反射率の差を用いて表面反射成分と内部反射成分とに分離する方法を提案する．まず，2色性反射モデルの仮定のもとに，表面反射率が入射光の偏光方向によって異なることを利用して，形状が既知の対象物からの反射光を，2種類の偏光成分の画像から，表面反射成分と内部反射成分とに分離する方法を明らかにする．次に，これを平面形状の対象物へ適用するための具体的方法を示す．さらに，平面对象物について，この方法によって両成分を分離することができ，光沢を除去した画像が得られることを，実験により確認する．

2.2 偏光を用いた表面反射成分と内部反射成分の分離

表面反射率が入射光の偏光方向によって異なることを利用し，反射光を表面反射成分と内部反射成分に分離する方法を導出する．前提条件として，対象物体での反射が2色性反射モデル [13] で表されること，および反射光の内部反射成分は非偏光であることを仮定する．

図 2.2 に，入射光 I_0 と反射光 I の入射角 θ_i ，反射角 θ_r ，位相角 θ_g および面の法線 N を示す．なお，位相角 θ_g とは入射光 I_0 と反射光 I が成す角のことである．

入射角 θ_i で波長 λ の入射光 $I_0(\lambda, \theta_i)$ に対する反射角 θ_r ，位相角 θ_g の反射光の強

度を $I(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g)$ で表す。なお、以下では、記述を簡潔にするために、特に混乱が生じない場合には $\lambda, \theta_i, \theta_r$ および θ_g といったパラメータを省略する。

反射光 I は、電界の振動面が法線 \mathbf{N} と反射光 I を含む面に平行な成分 (p 成分) と、それに垂直な成分 (s 成分) との和に分解することができ、各成分の強度を I_p, I_s と表すと、

$$I = I_p + I_s \quad (2.1)$$

となる。また、2色反射モデルによると、反射光 I は、表面反射成分と内部反射成分との和に分解することができる。従って、 I_p および I_s も、それぞれ表面反射成分と内部反射成分との和に分解できる。このうち、内部反射成分は、媒質内の色素によりランダムに散乱していると考えられるので、非偏光であると仮定する。すると、 I_p の内部反射成分強度 I_{pb} と、 I_s の内部反射成分強度 I_{sb} は等しくなり、

$$I_{pb} = I_{sb} = \frac{1}{2} I_b \quad (2.2)$$

となる。ここで、 I_b は、内部反射成分全体の強度である。従って、 I_p の表面反射成分強度を I_{pi} 、 I_s の表面反射成分強度を I_{si} と表すと、 I_p および I_s は、

$$I_p = I_{pi} + \frac{1}{2} I_b \quad (2.3)$$

$$I_s = I_{si} + \frac{1}{2} I_b \quad (2.4)$$

となる。2色反射モデルによると、表面反射光 $I_i(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g)$ は、波長に依存して決まる表面反射光の分光分布 $c_i(\lambda)$ と、幾何学的パラメータ $(\theta_i, \theta_r, \theta_g)$ に依存して決まる反射係数 $m_i(\theta_i, \theta_r, \theta_g)$ との積に分解することができ、

$$I_i(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) = m_i(\theta_i, \theta_r, \theta_g) c_i(\lambda) \quad (2.5)$$

となる。 $c_i(\lambda)$ は入射光 $I_0(\lambda)$ の分光分布と等しく、 $m_i(\theta_i, \theta_r, \theta_g)$ はその表面反射係数である。反射の法則 [15] より、表面反射では、入射角 θ_i と反射角 θ_r が等しく、また入射光と反射光は同一面内にあるので位相角 θ_g は $\pi/2$ である。よって、 $m_i(\theta_i, \theta_r, \theta_g)$ は θ_r のみの関数であるので、これを改めて $R(\theta_r)$ と表し、その p 成分を $R_p(\theta_r)$ 、s 成分を $R_s(\theta_r)$ とする。さらに、入射光の p 成分の強度を $I_{0p}(\lambda)$ 、s 成分の強度を $I_{0s}(\lambda)$ と表すと、 I_{pi} および I_{si} はそれぞれ、

$$I_{pi}(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) = I_{0p}(\lambda) R_p(\theta_r) \quad (2.6)$$

$$I_{si}(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) = I_{0s}(\lambda) R_s(\theta_r) \quad (2.7)$$

となる。いま、 $I_{0p}(\lambda)$ と $I_{0s}(\lambda)$ の分光分布が等しいと仮定し、定数 η を、

$$\eta = I_{0p}(\lambda)/I_{0s}(\lambda) \quad (2.8)$$

とする。式(2.3)(2.4)(2.6)(2.7)(2.8)から、 I_{pi} 、 I_{si} 、 I_{0p} および I_{0s} を消去すると、

$$I_b(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) = 2 \frac{I_p(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) - \mu(\theta_r)I_s(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g)}{1 - \mu(\theta_r)} \quad (2.9)$$

但し、

$$\mu(\theta_r) = \eta \frac{R_p(\theta_r)}{R_s(\theta_r)} \quad (2.10)$$

が得られる。いま、波長特性が $S(\lambda)$ の、光学系と撮像素子（以下、撮像系という）で撮像する場合を考え、式(2.9)の両辺に $S(\lambda)$ を掛けて $\lambda, \theta_i, \theta_g$ で積分すると、

$$\begin{aligned} & \iiint I_b(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) S(\lambda) d\lambda d\theta_i d\theta_g \\ &= \iiint 2 \frac{I_p(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) - \mu(\theta_r)I_s(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g)}{1 - \mu(\theta_r)} S(\lambda) d\lambda d\theta_i d\theta_g \end{aligned} \quad (2.11)$$

となる。式(2.11)において、

$$\begin{aligned} \iiint I_b(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) S(\lambda) d\lambda d\theta_i d\theta_g &= C_b(\theta_r) \\ \iiint I_p(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) S(\lambda) d\lambda d\theta_i d\theta_g &= C_p(\theta_r) \\ \iiint I_s(\lambda, \theta_i, \theta_r, \theta_g) S(\lambda) d\lambda d\theta_i d\theta_g &= C_s(\theta_r) \end{aligned}$$

とおくと、内部反射成分 $C_b(\theta_r)$ は、

$$C_b(\theta_r) = 2 \frac{C_p(\theta_r) - \mu(\theta_r)C_s(\theta_r)}{1 - \mu(\theta_r)} \quad (2.12)$$

で表される。また、表面反射成分 $C_i(\theta_r)$ は、 $C_b + C_i = C_p + C_s$ であるので、

$$C_i(\theta_r) = (C_s(\theta_r) - C_p(\theta_r)) \frac{1 + \mu(\theta_r)}{1 - \mu(\theta_r)} \quad (2.13)$$

となる。

式(2.12)、(2.13)において、 $C_p(\theta_r)$ および $C_s(\theta_r)$ は、反射光の特定方向の偏向成分を同一の波長特性 $S(\lambda)$ をもつ撮像系で撮像した結果であるので、面の法線 N が分かれば測定可能な量である。また、係数 $\mu(\theta_r)$ は、面の法線 N が分かれば計算可能である。従って、面の法線 N が分かれば、内部反射成分 $C_b(\theta_r)$ および表面反射成分 $C_i(\theta_r)$ は、式(2.12)、(2.13)から求められる。

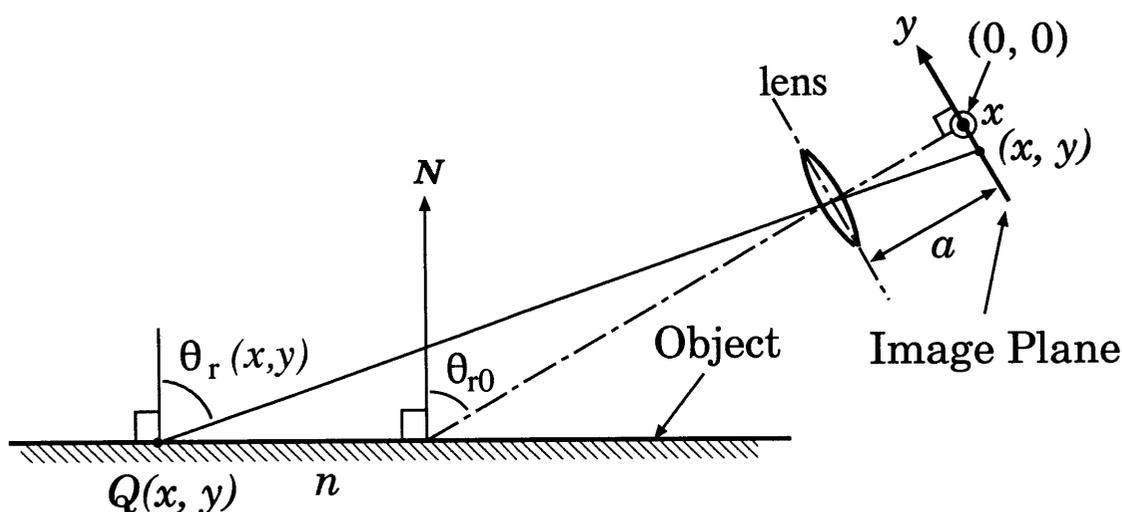


図 2.3 対象物と撮像系

2.3 平面对象物の光沢成分除去

2.3.1 光沢除去の方法

表面が平面の誘電体であって、その材質の屈折率が既知である場合について、前述の式 (2.12), (2.13) を使って内部反射成分と表面反射成分の画像を求める方法を述べる。

図 2.3 に、この場合の対象物と撮像系の関係を示す。ここで、撮像素子の向きは、素子の受光面の x 軸 (撮像画像の横方向に対応) が対象物の表面と平行となるように設定されている。

まず、撮像素子の受光面に結像される画像について、受光面上の座標 (x, y) とそれに対応する反射角 θ_r との関係を示す。なお、撮像素子の受光面上の座標 (x, y) の原点 $(0, 0)$ は、光軸が通過する位置とする。座標 (x, y) に結像される物体上の点を、 $Q(x, y)$ と表す。点 $Q(x, y)$ における反射角 $\theta_r(x, y)$ は、点 $Q(x, y)$ とレンズの主点とを結ぶ線が物体表面の法線 N となす角度である。従って、座標 (x, y) に対応する反射角 $\theta_r(x, y)$ は、

$$\theta_r(x, y) = \cos^{-1} \left(\cos(\tan^{-1} \frac{x}{a}) \cos(\theta_{r0} - \tan^{-1} \frac{y}{a}) \right) \quad (2.14)$$

となる。ここで、 a はレンズ主点と結像面 (撮像素子の受光面) との距離、一般には、

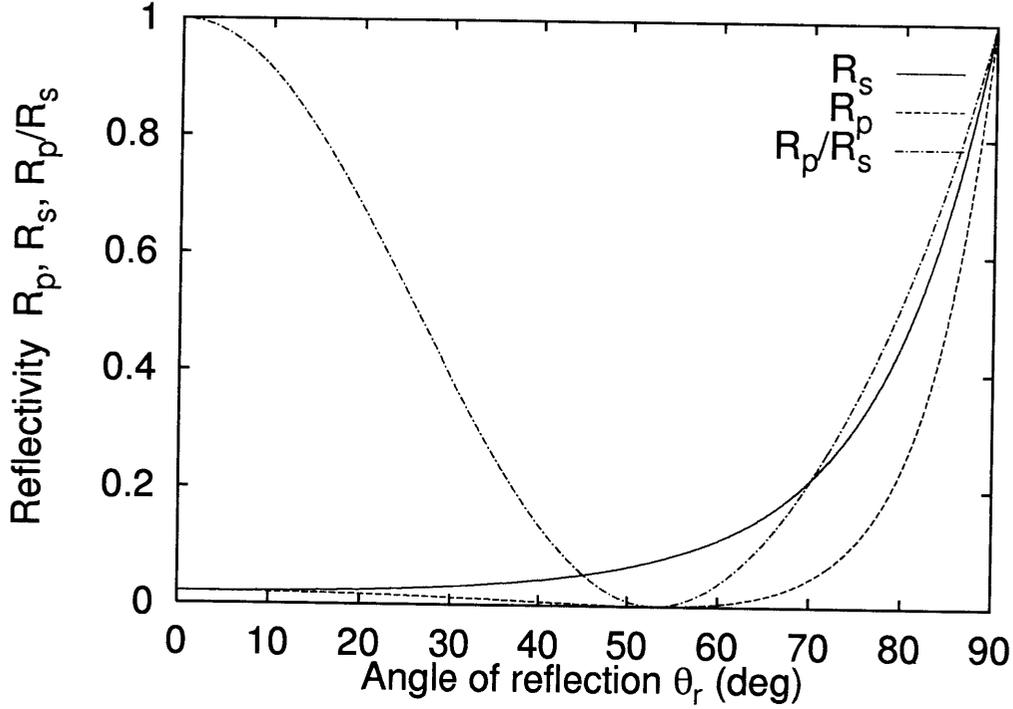


図 2.4 $n=1.33$ のときの R_p , R_s および R_p/R_s

$x \ll a$, $y \ll a$ であるので, 式(2.14)は,

$$\theta_r(x, y) \approx \theta_{r0} - \frac{y}{a} \quad (2.15)$$

となる. ここで, $\theta_r(0, 0)$ を θ_{r0} と表した.

Fresnel の公式と Snell の法則より, p 成分および s 成分の光の表面反射率は,

$$R_p(\theta_r) = \frac{\tan^2(\theta_r - \sin^{-1}(\sin \theta_r/n))}{\tan^2(\theta_r + \sin^{-1}(\sin \theta_r/n))} \quad (2.16)$$

$$R_s(\theta_r) = \frac{\sin^2(\theta_r - \sin^{-1}(\sin \theta_r/n))}{\sin^2(\theta_r + \sin^{-1}(\sin \theta_r/n))} \quad (2.17)$$

である [15]. 図 2.4 に, 屈折率 n が 1.33 の場合 (水の屈折率) について, R_p および R_s と θ_r との関係をグラフで示す.

従って, 座標 (x, y) に対応する係数 $\mu(\theta_r(x, y))$ は, 式(2.10)(2.16)(2.17)より,

$$\mu(\theta_r(x, y)) = \eta \frac{\cos^2(\theta_r(x, y) + \sin^{-1}(\sin(\theta_r(x, y))/n))}{\cos^2(\theta_r(x, y) - \sin^{-1}(\sin(\theta_r(x, y))/n))} \quad (2.18)$$

である. なお, η は式(2.8)で定義されたように, 入射光の p 成分と s 成分との比であるので, 照明光が非偏光 (自然偏光) のときには $\eta = 1$ となる.

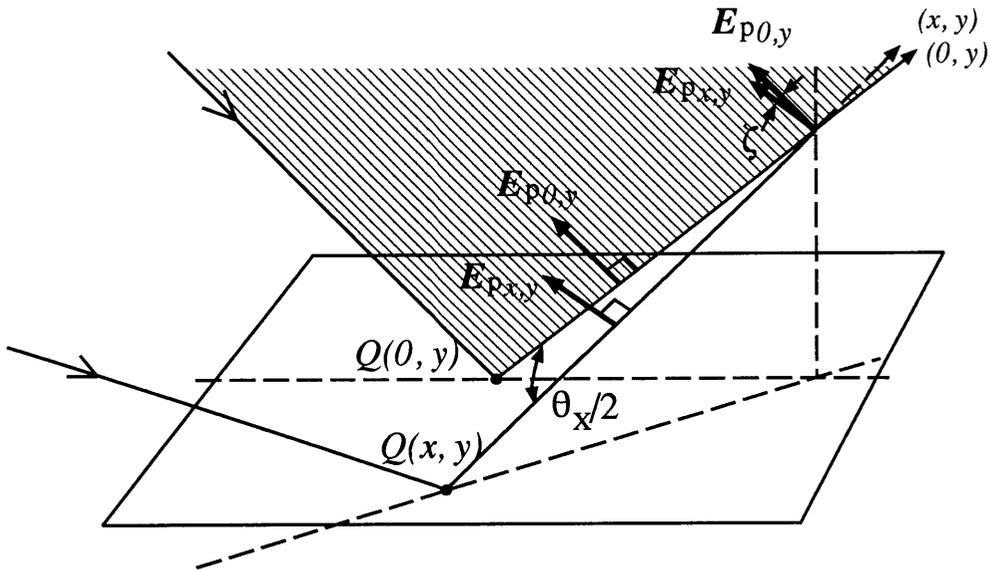


図 2.5 反射光の p 成分の電界ベクトルの方向

一方，カメラの水平画角 θ_X が $\theta_X \ll 1$ であるとき，反射光の p 成分の電界ベクトル \mathbf{E}_p は，図 2.5 から分かるように， x によらず，光軸と物体面の法線 \mathbf{N} とを含む面に平行であると近似できる．このとき，p 成分の画像 $C_p(x, y)$ と s 成分の画像 $C_s(x, y)$ は，レンズの前に偏光板を置き，この偏光板の偏光軸の方向を 2 通りに変えて撮像することにより得られる．なお，上記の近似によって生じる誤差は，反射光の p または s 成分の電界ベクトルと，偏光板の偏光面とが成す角を ζ と表すと，

$$\tan \zeta = \frac{\cos \theta_r \sin(\theta_X/2)}{\sqrt{\sin^2 \theta_r - \cos^2 \theta_r \sin^2(\theta_X/2)}} \quad (2.19)$$

となる（式の導出は付録参照）．

従って，式 (2.12)，(2.13) より，内部反射成分の画像 $C_b(x, y)$ および表面反射成分の画像 $C_i(x, y)$ は，p 成分の画像 $C_p(x, y)$ と s 成分の画像 $C_s(x, y)$ とから，

$$C_b(x, y) = 2 \frac{C_p(x, y) - \mu(\theta_r(x, y)) C_s(x, y)}{1 - \mu(\theta_r(x, y))} \quad (2.20)$$

$$C_i(x, y) = (C_s(x, y) - C_p(x, y)) \frac{1 + \mu(\theta_r(x, y))}{1 - \mu(\theta_r(x, y))} \quad (2.21)$$

によって計算することができる．上式から分かるように，本方法では光源の個数や配置などの情報は，計算する上で必要とならない．

2.3.2 検証実験

(a) 実験方法

表面が平面の誘電体の場合について、提案する方式によって、表面反射成分と内部反射成分を分離でき、対象物の光沢を除去した画像が得られることを、実験によって確かめる。図 2.6 に、この実験における対象物と撮像系の関係を示す。撮像には 2/3 インチの CCD テレビカメラ (モノクロ) を用い、撮像素子の向きは、素子の受光面の x 軸が対象物の表面と平行になるように設定した。カメラの水平画角 θ_X が小さい場合、前述のように、反射光の p 成分の電界ベクトルの方向は、 x によらず、光軸と物体面の法線とを含む面に平行であると近似できる。そこで実験では、レンズの前に偏光板を置き、この偏光板の偏光面を、光軸と物体面の法線とを含む面に平行にしたときと、光軸を中心に 90 度回転させたときとで、 p 成分の画像 $C_p(i, j)$ と s 成分の画像 $C_s(i, j)$ を撮像した。ここで、 (i, j) は、画素の座標を示し、その原点 $(0, 0)$ は光軸の位置である。撮像素子の x 方向および y 方向の画素間隔をそれぞれ D_x および D_y とするとき、撮像素子の受光面上の座標 (x, y) は、 $x = -D_x i$, $y = -D_y j$ である。

対象物は、黄色の硬質塩化ビニル (屈折率 $n=1.55$) 製の板上にマークとして幅 25mm のテープ (白色、表面は拡散反射的) を十字状に張り付けたものである。対象物は、実験室天井の複数の蛍光灯 (拡散格子付き) により照明され、撮像部の位置から見たときに表面に光沢が発生する状況になっている。偏光板にはポラロイドを用いた。なお、カメラの焦点距離 a は 26.7mm (実測値)、対象平面とカメラ光軸が成す角度 θ_{r0} は 62 度 (1.08rad)、画素間隔 D_x および D_y はそれぞれ 11 μm および 13 μm (いずれも実測値) である。撮像画像の水平画角は約 15 度、垂直画角は約 13 度である。

(b) 実験結果

撮像された p 成分の画像 C_p , s 成分の画像 C_s , および両画像から本方法によって得られた内部反射成分の画像 C_b , 表面反射成分の画像 C_i を、それぞれ図 2.7(a) から (d) に示す。また、撮像部の位置から通常のカメラ (偏光板なし) で撮像した場合の画像 C を、同図 (e) に示す。これらの画像において、天井蛍光灯の反射像は光沢である表面反射成分により生じているものである。同図 (e) の通常のカメラで撮像した画像 C では光沢が発生しているのに対し、本方法によって表面反射成分と内部反射成分が分離でき、同図 (c) の内部反射成分の画像 C_b では光沢がほぼ除去されていることが確認できる。なお、内部反射成分の画像 (c) において、天井蛍光灯の反射像が多少残っているのは、画素間隔 D_x と D_y の誤差およびテレビカメラの非直線性による反射光強度値の誤差が主な原因と考えられる。

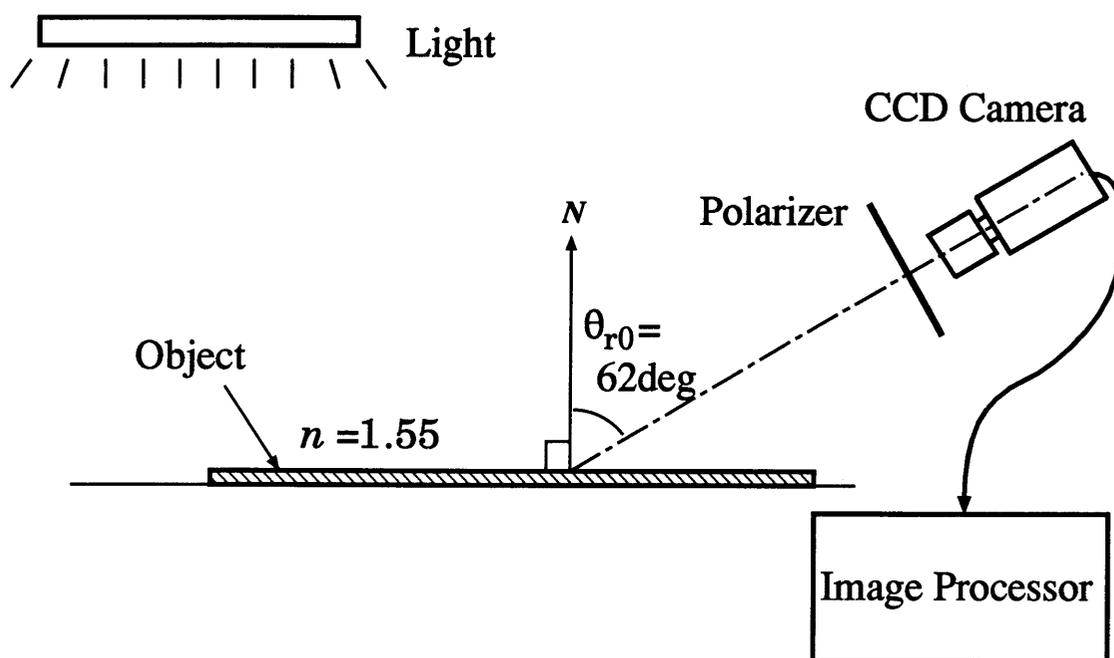


図 2.6 実験方法

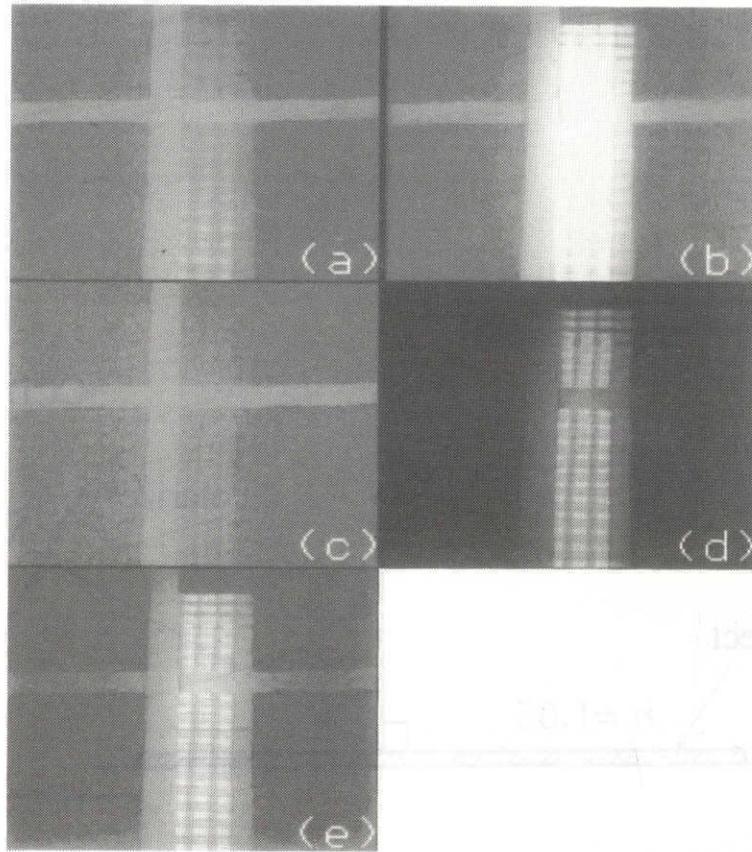
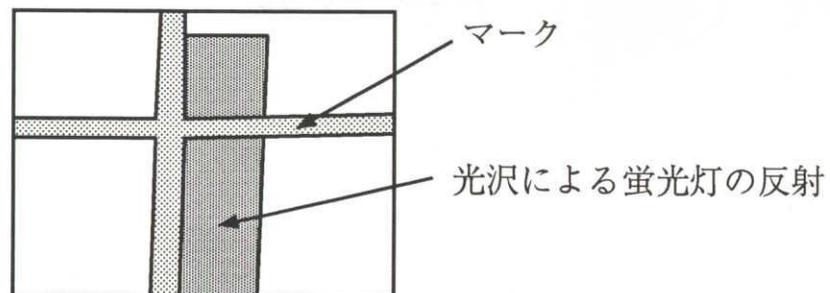


図 2.7 実験結果：(a) p 偏光成分の画像 C_p ，(b) s 偏光成分の画像 C_s ，(c) 内部反射成分 C_b ，(d) 表面反射成分 C_i ，(e) 通常のカメラによる画像 C 。



2.4 結言

光沢を除去した画像をセンシングすることを目的に、プラスチックなどからの反射光を、偏光による表面反射率の差を用いて、光沢の原因である表面反射成分と対象物についての情報を含む内部反射成分とに分離する方法を導出した。この方法で扱えるのは、表面形状と屈折率が既知で、自然偏光の任意の光源で照明されている、2色性反射モデルが仮定可能なプラスチックなどの誘電体からの反射光である。本方法を表面が平面の物体に適用し、表面反射成分と内部反射成分が分離でき、光沢が除去された画像が得られることを、実験によって確認した。以上により、表面反射成分と内部反射成分とを分離し、光沢を除去した画像をセンシングする方法を示した。

第 3 章

屋内自律走行車のための視覚システム

3.1 緒言

前章では、光沢のあるプラスチックなどを対象とした画像センシング法として、物体からの反射光を、偏光を用いて表面反射成分と内部反射成分とに分離し、光沢の影響を受けることなく画像をセンシングする方式を提案した。本章では、この画像センシング法を、屋内用自律走行車の視覚へ適用する。

産業分野における自動化の重要な研究開発対象として、部品や製品などの搬送の自動化が挙げられる。このために、床面に車を誘導するための目印を設け、センサでこれを検出して自律走行する、無人搬送車が開発されている [16] [18] [19]。屋内用自律走行車の誘導方式には、目印に磁性ストリップを用いる磁気誘導方式、電磁誘導線を用いる電磁誘導方式および白線などを用いる光学誘導方式がある。これらのうち、実用化されている自律走行車の大半は、磁気誘導方式または電磁誘導方式である。一方、光学誘導方式は、走路の設定や変更の自由度が高い特長がある。さらに、走路のすべてに渡って白線を設定するのではなく、要所に灯台の働きをする道標として白線などのマークを設け、それらのマークから車の現在位置や走行経路を算出して走行することも考えられる。

このような光学誘導方式では、白線などの検出手段に視覚センサを用いるため、照明条件をはじめとした環境の影響を受けやすいという問題がある。そのなかでも、屋内の床面に引かれた白線を認識して走行する自律走行車では、床面に光沢があると、その影響によって白線を確実に検出することができないという問題がある。これを解決する 1 つの方法は、白線が認識しやすいように、床面の材質や照明環境を整えることである。しかし、視覚を用いる優位性を生かすためには、環境条件に特別な手を加えることなく白線を安定に検出できる方法が望まれる。そのような方法としては、白線の認識処理アルゴリズムの改良と、画像センシングの改良との 2 つが考えられる。

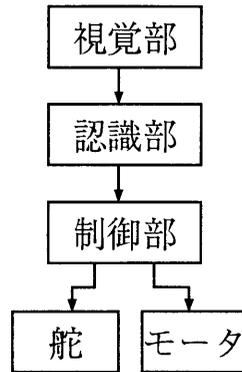


図 3.1 自律走行車の構成

本章では、後者の画像センシングの改良による方法として、光沢の影響を受けない屋内自律走行車の視覚システムについて述べる。まず、液晶の電気光学的性質を利用し、第2章で示した方式によって光沢成分を除去した画像を得る、自律走行車用の視覚センサの実現方法を提案する。次に、この方法による視覚センサを試作し、その性能を評価する。さらに、これを自律走行車の視覚システムに適用したときの効果を、実験によって確かめる。

3.2 屋内自律走行車

対象とする実験用屋内自律走行車の構成を図 3.1 に示し、その外観を図 3.2 に示す。自律走行車は、屋内の床に引かれた白線を検出して、それらに沿って走行する。このための自律走行車の機構は、視覚部、認識部および制御部からなる。視覚部は前方の画像をカメラで入力し、認識部はその画像から白線を認識して白線位置を算出する。白線認識のアルゴリズムは、画像の明るさを空間的に微分する Sobel オペレータによってエッジ強調した後に、2 値化して直線当てはめを行うものである。制御部は、白線位置情報をもとに舵と車速の制御を行う。認識に用いる画像の解像度は 256×256 画素、走行速度は最大 200 mm/s である。

図 3.3 に、自律走行車が走行する環境を示す。床面は、塩化ビニル製で天井灯によって照明されており、照明灯の反射で光沢が発生している。このため、自律走行車の視覚システムへの画像入力に一般のテレビカメラを用いると、光沢が雑音となって、安定した画像が得られない場合が発生する。

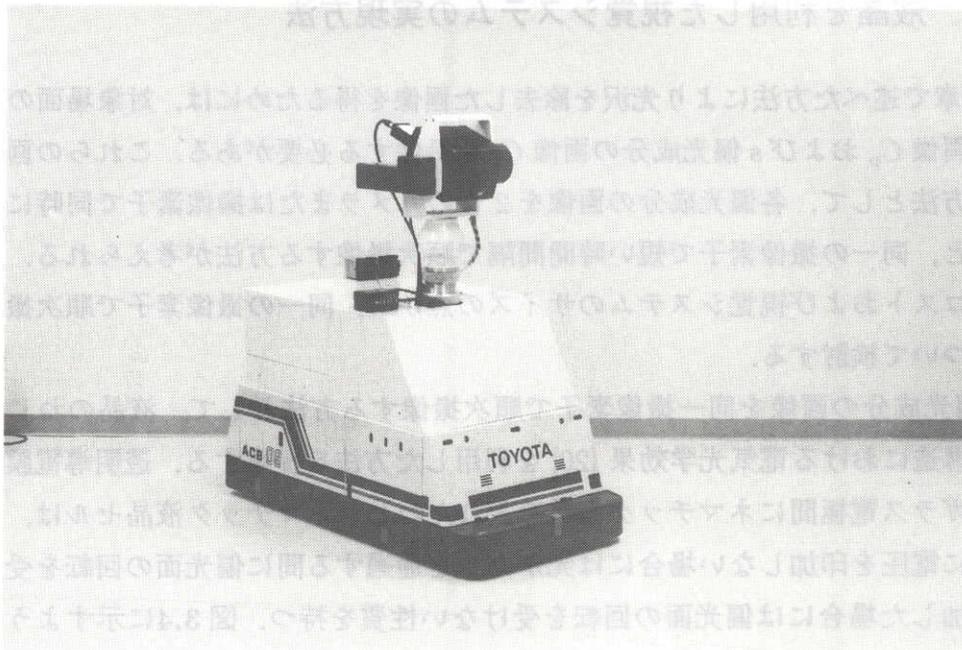


図 3.2 自律走行車の外観

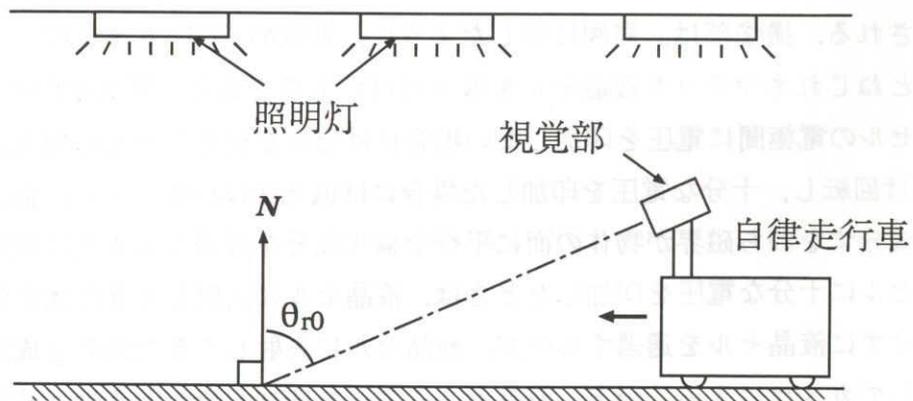


図 3.3 自律走行車の走行環境

3.3 光沢の影響を受けない視覚システム

3.3.1 液晶を利用した視覚システムの実現方法

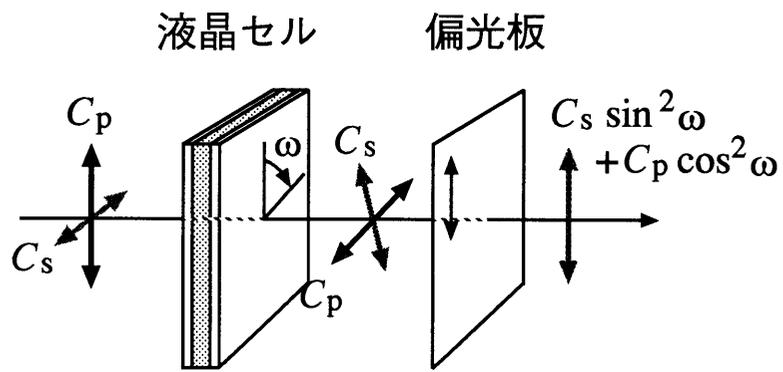
第2章で述べた方法により光沢を除去した画像を得るためには、対象場面の p 偏光成分の画像 C_p および s 偏光成分の画像 C_s を撮像する必要がある。これらの画像を撮像する方法として、各偏光成分の画像を2つのカメラまたは撮像素子で同時に撮像する方法と、同一の撮像素子で短い時間間隔で順次撮像する方法が考えられる。本研究では、コストおよび視覚システムのサイズの点から、同一の撮像素子で順次撮像する方法について検討する。

各偏光成分の画像を同一撮像素子で順次撮像する方法として、液晶のねじれネマチック構造における電気光学効果 [20] を利用した方法を提案する。透明導電膜をコートしたガラス電極間にネマチック液晶を入れたねじれネマチック液晶セルは、セルの電極間に電圧を印加しない場合には光がセルを通過する間に偏光面の回転を受け、電圧を印加した場合には偏光面の回転を受けない性質を持つ。図 3.4 に示すように、この液晶セルに偏光板を組合せることで、次節で説明するように、p 成分と s 成分の画像を、同一の撮像素子によって、短い時間間隔で順次撮像するように構成することができる。

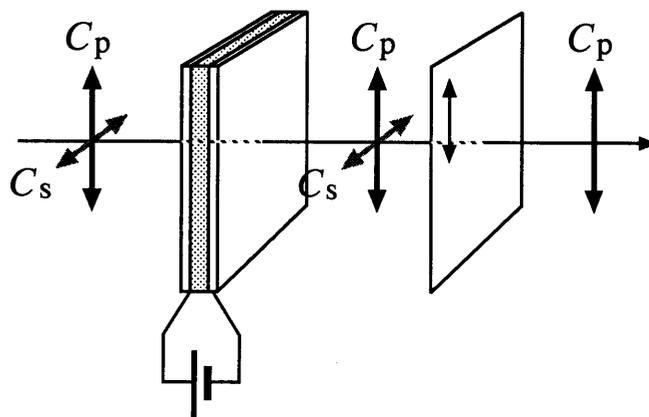
3.3.2 視覚システムの構成

図 3.5 に、視覚システムの構成を示す。この視覚システムは、撮像部と処理部とから構成される。撮像部は、同図に示したように、通常の CCD カメラのレンズの前に偏光板とねじれネマチック液晶セルを取り付けたものである。図 3.4 で示したように、液晶セルの電極間に電圧を印加しない場合にはセルを通過した光の偏光面が一定角度 ω だけ回転し、十分な電圧を印加した場合には偏光面は回転しない。偏光板の向きは、p 成分すなわち磁界が物体の面に平行な偏光成分を透過するように設定してある。液晶セルに十分な電圧を印加したときは、液晶セルに入射してきた光が偏光面の回転を受けずに液晶セルを通過するので、液晶セルに入射してきた光の p 成分が偏光板を透過してカメラに入る。一方、液晶セルに電圧を印加しないときは、液晶セルに入射してきた光が液晶セルを通過する間に角度 ω だけ偏光面の回転を受ける。従ってこのときは、液晶セルに入射してきた光のうち p 成分が $\cos^2 \omega$ 、s 成分が $\sin^2 \omega$ の割合で偏光板を透過してカメラに入る。

よって、電圧無印加時の画像を $C_0(i, j)$ 、電圧印加時の画像を $C_1(i, j)$ とすると、



(a) 電圧を印加しない場合



(b) 電圧を印加した場合

図 3.4 ねじれネマチック液晶セル

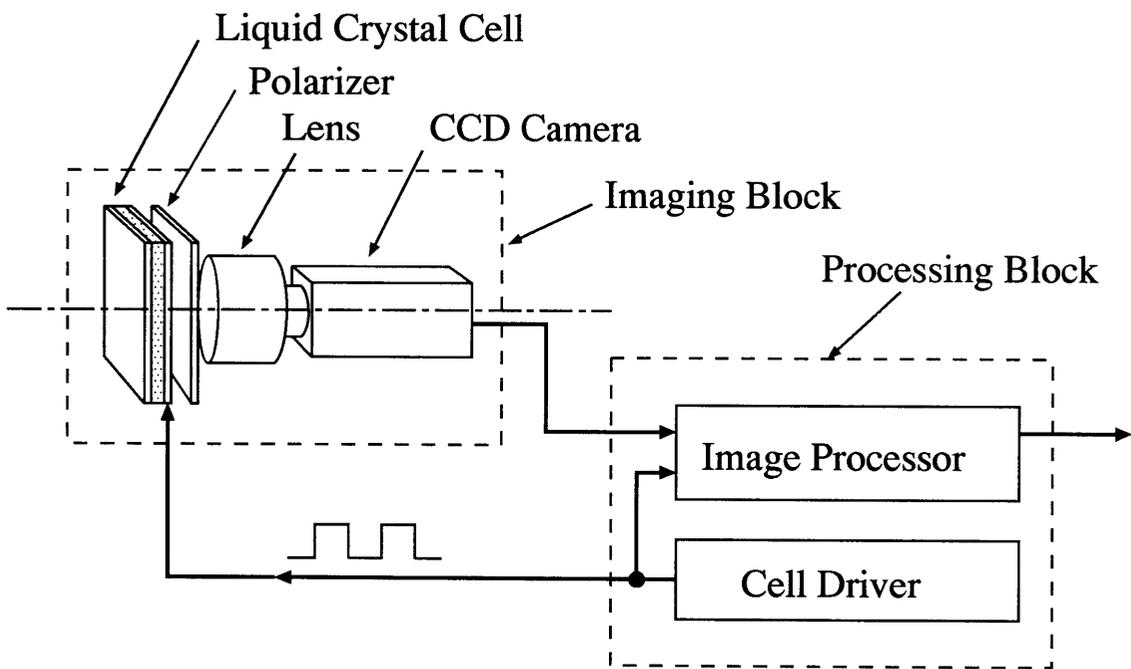


図 3.5 視覚システムの構成

p 成分の画像 $C_p(i, j)$ および s 成分の画像 $C_s(i, j)$ は,

$$\begin{aligned} C_p(i, j) &= C_1(i, j) \\ C_s(i, j) &= \frac{C_0(i, j)}{\sin^2 \omega} + \frac{C_1(i, j)}{\tan^2 \omega} \end{aligned}$$

である。ここで、 (i, j) は、画素の座標を示し、その原点 $(0, 0)$ は光軸の位置である。撮像素子の x 方向および y 方向の画素間隔をそれぞれ D_x および D_y とするとき、撮像素子の受光面上の座標 (x, y) は、 $x = -D_x i$, $y = -D_y j$ である。

処理部は、液晶セルドライバで液晶セルへの印加電圧を制御し、CCD カメラで画像 $C_0(i, j)$ および $C_1(i, j)$ を順次撮像して、画像処理装置の画像メモリに取り込み、前述の方法で内部反射成分の画像を計算する。なお、今回用いた液晶セルでは、 $\omega = 0.59\text{rad}$ 、印加電圧は 9V、液晶セルの反応時間は常温で約 60ms である。

3.3.3 光沢除去性能

前記の構成による視覚システムを試作し、その光沢除去性能を以下の方法で測定した。図 3.6 に、測定のための撮像条件と撮像対象物を示す。視覚システムの撮像部は、同図 (a) に示すように、撮像素子の受光面の x 軸 (撮像画像の横方向に対応) が対象物と平行で、光軸と対象物の法線 N とが成す角度が 62 度になるように位置決めした。カメラの撮像素子は、素子サイズが 2/3 インチで、画素間隔 D_x および D_y はそれぞれ $11 \mu\text{m}$ と $13 \mu\text{m}$ である。また、カメラレンズの焦点距離は 26.7mm で、撮像画像の水平画角は約 15 度、垂直画角は約 13 度である。対象物は、図 3.6(b) に示すように、底に無反射板を敷いた容器に水 (屈折率 $n=1.33$) を入れ、その反射光が表面反射成分のみであるようにしたものである。従って、もし表面反射成分が内部反射成分から完全に分離できれば、視覚システムで得られる内部反射成分の画像の明るさはゼロになるはずである。対象物は照明灯により照らされ、撮像部の位置から見たときに対象物表面に光沢が発生する状況になっている。照明光は非偏光であるので、 $\eta = 1$ である。以上の装置を用いて、視覚システムの表面反射成分の除去性能を測定した。

図 3.7 に、視覚システムの表面反射成分の除去性能の測定結果を示した。同図において、 $j = -200, 0, 200$ は、 $i = 0$ のとき、それぞれ $\theta_r = 67.6$ 度、62.0 度、56.4 度の位置に相当する。除去性能として、全成分のうち内部反射成分画像に残っている表面反射成分量の割合を指標とした。すなわち、視覚システムで得られた画素 (i, j) の内部反射成分を $C_b(i, j)$ 、表面反射成分を $C_i(i, j)$ とするとき、表面反射成分の除去性能を示す指標 (表面反射成分の残存率) は、

$$\frac{2C_b(i, j)}{C_b(i, j) + C_i(i, j)}$$

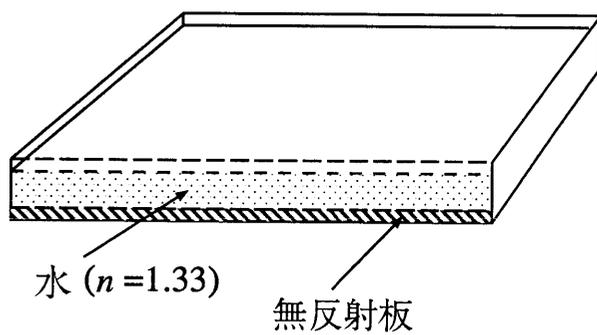
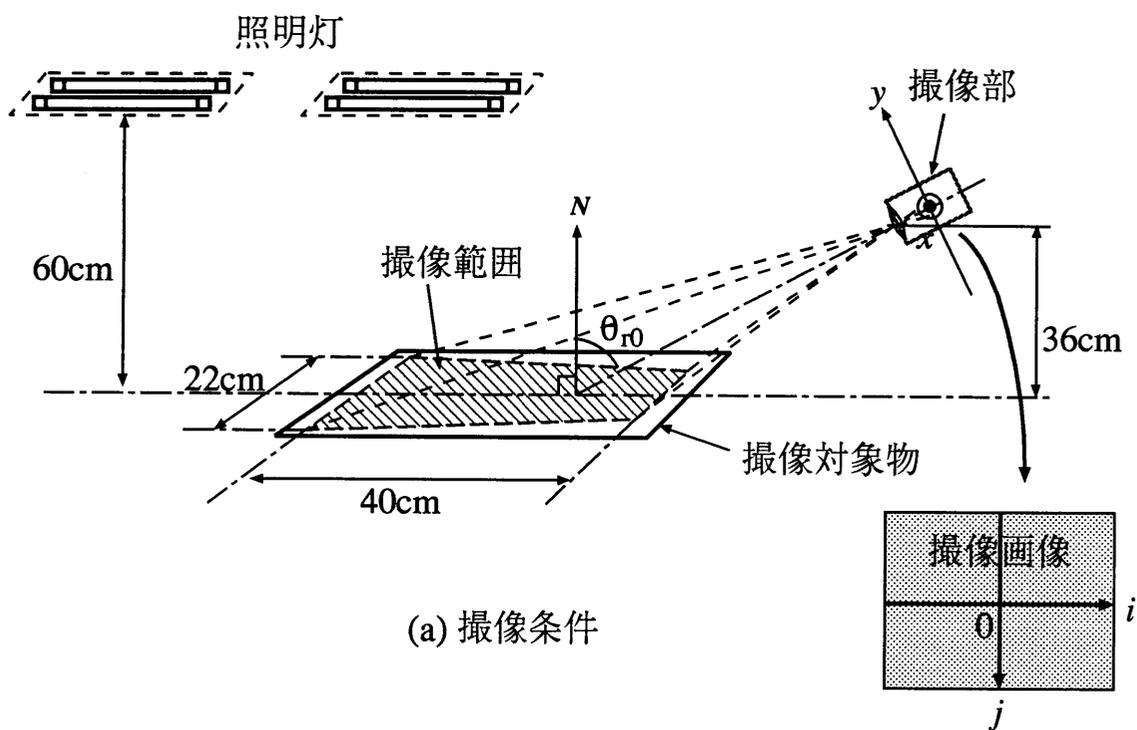


図 3.6 表面反射成分除去性能の測定方法

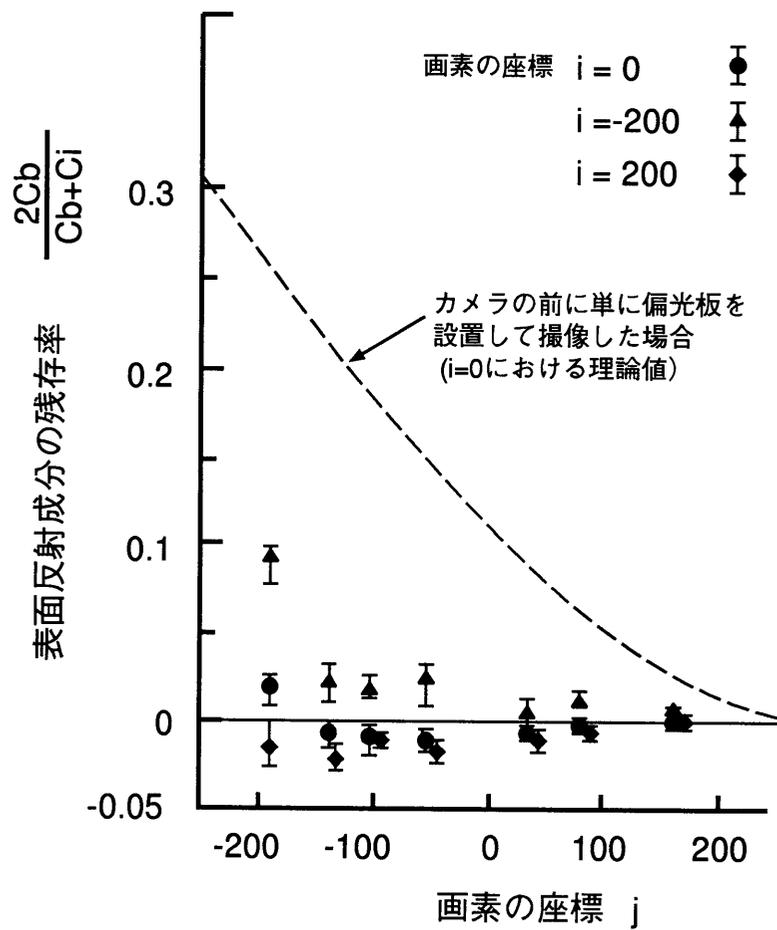


図 3.7 視覚システムの表面反射成分除去性能

である。同式の分母の係数2は、視覚システムが全く機能しない場合、すなわち視覚システムから得られた内部反射成分 $C_b(i, j)$ と表面反射成分 $C_s(i, j)$ が等しい場合に、上記の指標が1となるようにするための係数である。また、図3.7において、点線は、カメラの前に単に偏光板を置いて撮像した画像 (C_p に相当) の場合の表面反射成分除去特性

$$\frac{2C_p(0, j)}{C_p(0, j) + C_s(0, j)}$$

の理論値を計算した結果を示す。

図3.7より、本視覚システムにより表面反射成分をほとんど分離することができ、テレビカメラの前に単に偏光板を置く場合に比べ十分に効果があることが示された。なお、 i が0から離れると視覚システムの表面反射成分除去特性が悪くなるのは、反射光のpおよびs成分ベクトルの方向が、 i が0の位置では偏光板の偏光軸に合致しているが、 i が0から離れるにしたがって、偏光板の偏光軸からわずかにずれるためと考えられる(式(2.19)を参照)。また、 j が-200の付近で表面反射成分の残存率が0.1近くまで増加して除去特性が悪くなるのは、図2.4から分かるように、角度 θ_r が大きくなると R_p と R_s との差が小さくなるために画像の濃度方向の誤差による影響が大きくなるためであると考えられる。

3.4 屋内自律走行車の視覚としての有効性

3.4.1 実験方法

本方式を用いた視覚システムを、自律走行車の視覚部に適用した。前述のように、自律走行車は屋内の床に引かれた白線に沿って走行するが、床は平面であるため、走行車が動いてもレンズ光軸と床の法線とのなす角度 θ_{r0} は一定に保たれる。

この自律走行車の視覚部に本視覚システムを用い、内部反射成分の画像を使って認識部で白線を認識するようにした。視覚システムのカメラはフィールド蓄積ノンインタレース走査で、このときの縦方向の画素間隔は $26 \mu\text{m}$ である。フィールド蓄積ノンインタレース走査とは、図3.8に示したように、撮像素子上でフィールド単位で露光してその画像をノンインタレース走査で読み出すことで、動きのある対象物を高速に撮像するのに適した方法である。各偏光成分の画像は、1/60秒の間隔をおいて撮像した。この間に自律走行車が動く距離は3mmであり画像上では約1画素であるので、各偏光成分の画像間の画素の位置ずれは無視できると考えた。

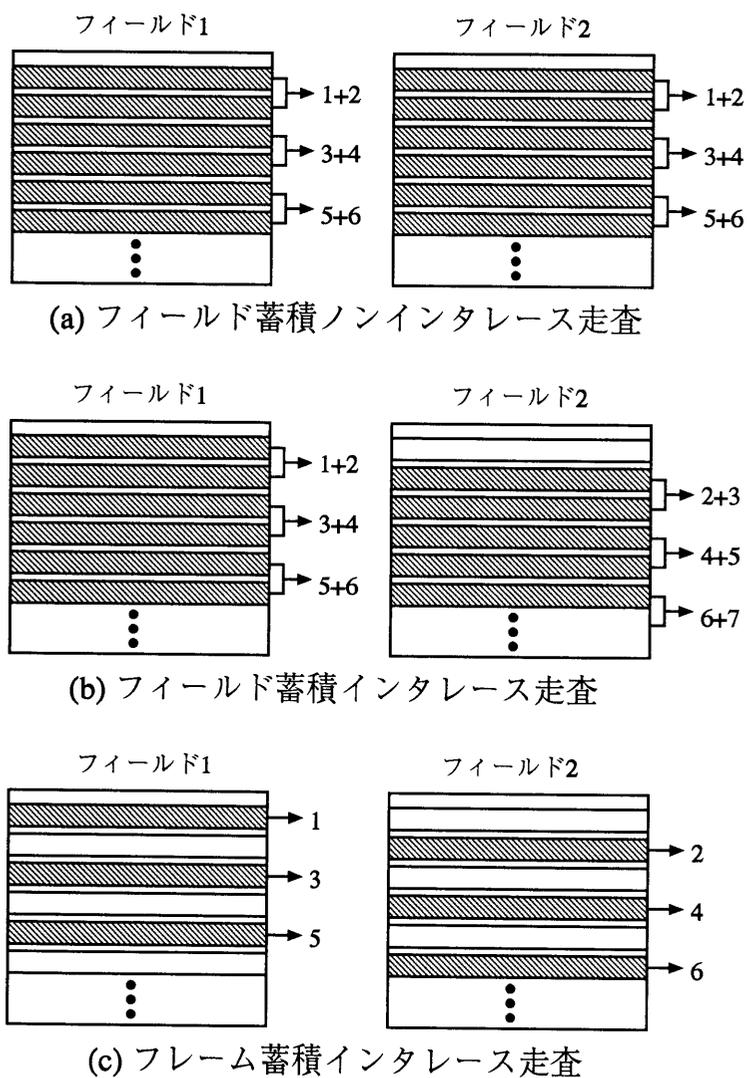


図 3.8 テレビカメラの蓄積モードと走査方式

3.4.2 実験結果

図 3.9 (a) と (b) に、同一の場面について、走行車の視覚部として通常のテレビカメラを用いた場合に得られた画像と、本方式の視覚システムを用いた場合に得られた内部反射成分の画像とを、それぞれ示す。図 3.9(a) の通常のカメラの画像では、床の光沢の影響のために、床の白線の一部が見えなくなっていることが分かる。これに対し、図 3.9(b) の視覚システムの画像では、通常のカメラの画像で問題となっていた床の光沢が除去されており、床の白線が明瞭に検出されている。

図 3.10 に、通常のカメラの画像および本視覚システムの画像のそれぞれに対して、白線エッジを抽出した結果を示す。白線エッジの抽出は、Sobel オペレータを施した後に判別分析法によって 2 値化レベルを決定して 2 値化することにより行った。同図から、通常のカメラを用いた場合には白線のエッジの一部しか抽出することができないのに対し、本視覚システムを用いた場合には白線のエッジが画像全体に渡って明瞭に抽出でき、本方式が有効であることが分かる。

なお、図 3.9 において、(a) の画像が (b) に比べて白線のコントラストが弱い原因は、カメラのレンズ絞りの設定の違いによるものと考えられる。図 3.10 の白線エッジの抽出結果は、判別分析法により 2 値化レベルを決定しているため、画像のコントラストの違いには影響されていない。また、図 3.10(a) において、光沢が存在しない部分の白線エッジの抽出結果が、同図 (b) の場合よりも鮮明度が劣る原因は、2 値化レベルの決定が光沢部分の影響を受けるためである。

3.5 結言

床面の光沢の影響を受けない屋内自律走行車の視覚システムの実現を目的に、光沢成分を除去する機能を持った自律走行車用視覚システムについて述べた。光沢成分を除去した画像が得られる視覚システムを液晶を利用して実現する方法を提案し、この方法による視覚システムを試作して性能を評価した。これを自律走行車の視覚に適用し、光沢のある床面でも白線が検出できるようになることを実験により示した。以上により、本方式による視覚システムを用いることにより、画像センシング部分の改良により、白線認識アルゴリズムを特別に改良することなく、光沢のある環境下でも白線が安定に検出できるようになることを示した。

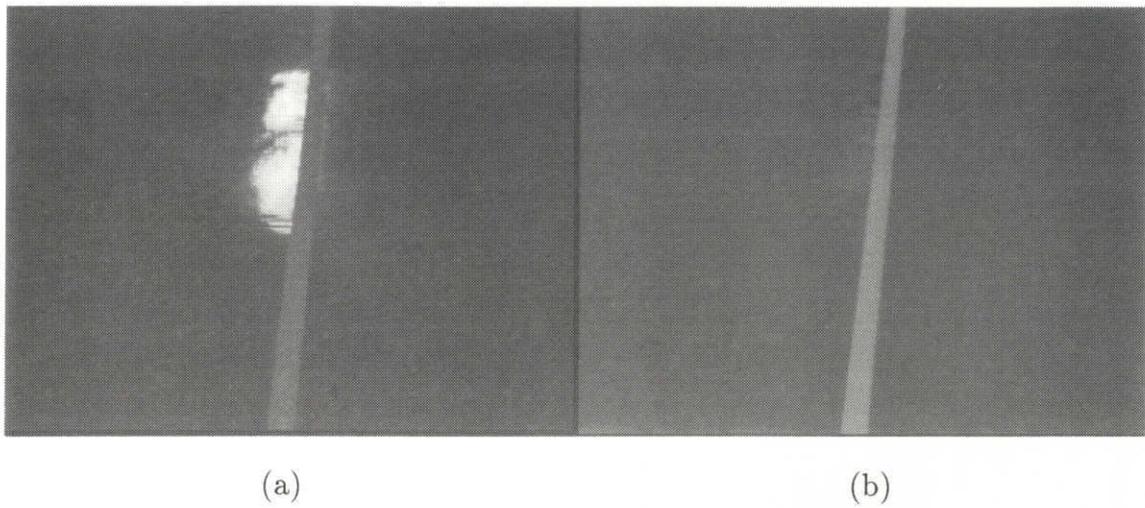


図 3.9 実験結果：(a) 通常のテレビカメラによる画像，(b) 視覚システムによる内部反射成分画像.

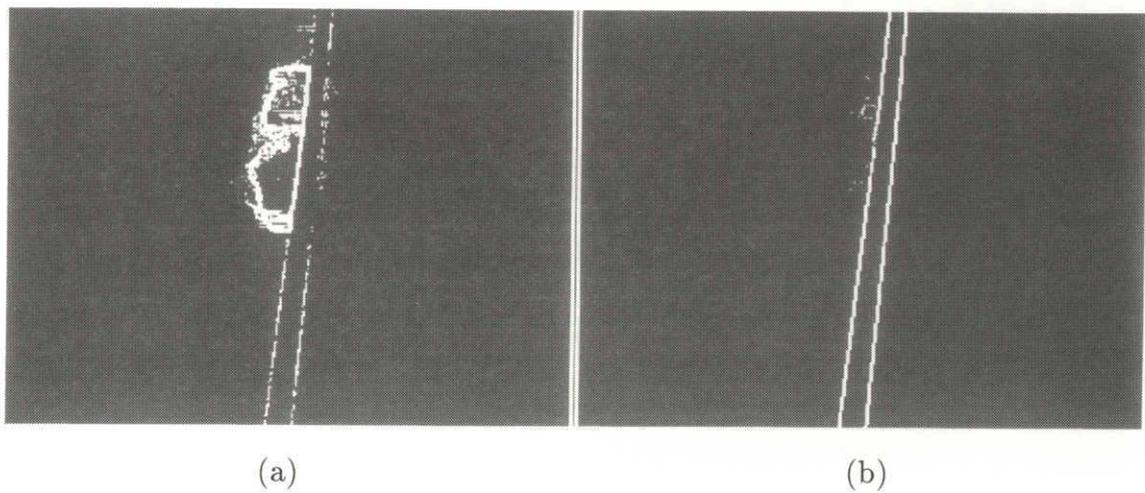


図 3.10 図 3.9 (a)(b) の画像からの白線エッジ抽出結果

第 4 章

ダイナミックレンジの広い画像センシング方式

4.1 緒言

第 2 章および第 3 章では，マシンビジョンが照明環境の変動に弱い原因である第 1 番目の問題として，光沢のある物体を対象とした画像センシング法とその応用について述べた．本章では，第 2 の問題として，照明環境が整備されていない下でも情報を欠落させることなく画像をセンシングできるような，明るさのダイナミックレンジが広い画像センシング法について述べる．

明るさのダイナミックレンジが広い画像センシングを可能にするためのアプローチとしては，テレビカメラの撮像素子の特性を改良する方法と，従来の撮像素子を用いて撮像した複数の画像を合成する方法とがある．

前者の素子自身によるものの 1 つに，撮像素子を冷却して雑音発生を減少させることによりダイナミックレンジを広げる，冷却型 CCD カメラがある．この方式は，電荷信号の読みだし時に発生する雑音を抑えるために読みだし速度を遅くする必要があるため，通常のテレビカメラに比べてフレームレートが比較的低い．また，冷却が必要なために一般に高価である．素子の特性を改良する別の方法としては，読みだし用 CCD に電荷を転送する前に電荷信号を対数圧縮することでダイナミックレンジを拡大する方法がいくつか提案されており，リニアセンサ [22] や 128 画素×128 画素のエリアセンサ [23] を開発した例など [24] [25] [26] が報告されている．しかし，画素ごとの特性を揃えることが難しいことや発熱量の問題などのため，標準的カメラに使われるエリアセンサの画素数である 30 ～ 40 万画素の撮像素子は研究開発段階である．

後者の撮像画像を合成する方法については以下のものがある．よく知られた方法としては，同一の情景を n 回撮像した画像を加算平均して雑音（白色雑音）を $1/n$ に減らすことでダイナミックレンジを広げる方法があるが，そのダイナミックレンジ拡大量は小さい．一方，露光条件の異なる撮像画像を合成することによる方法に関して，以下

の研究が報告されている。Rangayyan ら [27] は、X線写真フィルムの良質な画像入力のために、照度を変化させた複数の撮像画像を合成し、ダイナミックレンジを拡大できることを示している。井口ら [28] は、光沢物体等の明暗変化の著しい対象物の画像入力のために、絞りを変えた複数の画像合成でその有効性を検証している。また、松山ら [29] [30] は、カラー画像を対象に画像合成によって従来より信頼性の高い色度と明度の情報が得られることを示している。さらに、森脇 [31] は、シャッタースピードを変えて撮像した画像合成により、色彩情報を重視したカラー画像を入力する方法を提案している。これらの研究は、色彩情報の入力への適用を目的の中心とした、基礎検討的なものである。また、明るさのダイナミックレンジが広い画像センシングという観点からは十分な検討がなされているとはいえない。

本章では、ダイナミックレンジの広い画像センシングを目的に、露光条件の異なる画像の合成によってモノクロテレビカメラのダイナミックレンジを拡大する方式を提案する。まず、露光条件の異なる画像の合成によってダイナミックレンジを拡大する原理を示し、露光条件とダイナミックレンジ拡大率との関係、および得られる画像の特性を明らかにする。次に、カメラが理想的特性を持つ場合について画像合成のアルゴリズムを述べた後、実際のカメラにこのアルゴリズムを適用した場合の問題点を指摘し、その問題を解決するアルゴリズムを示す。最後に、このアルゴリズムにより問題点が解決できることを、実験によって示す。

4.2 露光条件の異なる撮像画像の合成によるダイナミックレンジの拡大

同一の情景を複数の異なる露光条件で撮像し、これらの撮像画像のなかで有効な情報が得られている画像を、画素ごとに選択して合成することにより、飽和することなく広いダイナミックレンジをもつ画像を得ることができる。本節では、露光条件の異なる撮像画像の合成によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大する原理を示し、露光条件とダイナミックレンジ拡大率との関係および得られる画像の特性を明らかにする。

ここでは、テレビカメラをガンマ特性をもつ撮像装置としてモデル化して考える。すなわち、撮像装置への入射光強度を I 、ガンマパラメータを γ とすると、入射光強度 I に対する撮像装置の出力値 L は、

$$L(I) = \begin{cases} (EI)^\gamma & ((EI)^\gamma < L_{\text{sat}}) \\ L_{\text{sat}} & ((EI)^\gamma \geq L_{\text{sat}}) \end{cases} \quad (4.1)$$

と表されるものとする。ここで、 L_{sat} は出力値 L の飽和レベルである。また、 E は

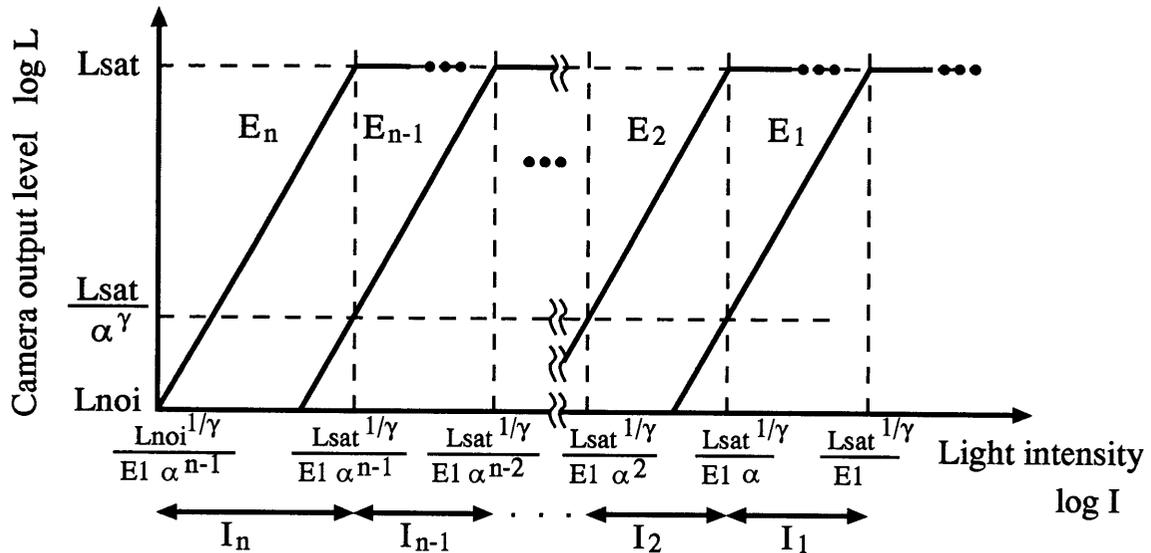


図 4.1 露光条件 E_1, E_2, \dots, E_n で撮像したときの光強度 I と出力値 L の関係

露光条件によって決まる比例係数である。露光条件を変化させる手段としては、例えば、シャッタースピードによる露光時間の変化、照明強度の変化、減光フィルタの濃度の変化などが考えられる。レンズ絞りの変化も考えられるが、これには一般に焦点深度の変化が伴うために、露光条件を変化させる手段としては好ましくない。例えば、露光条件として露光時間を変化させる場合、露光時間を α 倍にすると比例係数 E はもとの α 倍になる。なお、以下では記述を簡単にするため、比例係数が E となる露光条件のことを、単に露光条件 E と記述する。

露光条件の種類を n とし、各露光条件を E_1, E_2, \dots, E_n と表すと、 i 番目の露光条件 E_i が、

$$E_i = E_1 \alpha^i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.2)$$

の関係になるように各露光条件を設定する。 α は露光条件を関係付ける定数で、ここでは 1 以上の値である。例えば、露光時間を α 倍ずつ順次長くしていくことで、このような露光条件を実現できる。露光条件 E_1, E_2, \dots, E_n で撮像したときの光強度 I と出力値 L の関係は、図 4.1 に示すようになる。

同図で示されるように、 i 番目の露光条件 E_i による撮像で検出する光強度 I_i の範

囲を,

$$\begin{cases} \frac{L_{\text{sat}}^{1/\gamma}}{E_1 \alpha^i} \leq I_i \leq \frac{L_{\text{sat}}^{1/\gamma}}{E_1 \alpha^{i-1}} & (i < n) \\ \frac{L_{\text{noi}}^{1/\gamma}}{E_1 \alpha^{n-1}} \leq I_i \leq \frac{L_{\text{sat}}^{1/\gamma}}{E_1 \alpha^{i-1}} & (i = n) \end{cases} \quad (4.3)$$

とする. すると, E_1 から E_n までの n 種類の露光条件による撮像で, $L_{\text{noi}}^{1/\gamma}/(E_1 \alpha^{n-1})$ から $L_{\text{sat}}^{1/\gamma}/E_1$ の光強度範囲をカバーすることができ, そのダイナミックレンジ D_n は,

$$D_n = \left(\frac{L_{\text{sat}}}{L_{\text{noi}}} \right)^{1/\gamma} \alpha^{n-1} \quad (4.4)$$

となる. なお, 式(4.3)および式(4.4)において, L_{noi} は撮像装置の雑音レベルを表す. 式(4.4)から分かるように, ダイナミックレンジ D_n は, 式(4.2)の露光条件の変化率 α を大きくするほど, 大きくなる. 一方, 図4.1から分かるように, 露光条件 E_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) に対応した各光強度範囲において, 撮像装置の出力値と雑音との比は光強度が $L_{\text{sat}}^{1/\gamma}/(E_1 \alpha^i)$ のときに最小となり, 入射光強度に換算して $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ となる. 従って, 露光条件の変化率 α を大きくするほど S/N が小さくなる. また, 図4.1から分かるように, 光強度に換算した信号と雑音の比が $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ 以上であるダイナミックレンジ $D_{\text{eff } n}$ は,

$$D_{\text{eff } n} = \alpha^n \quad (4.5)$$

となる.

従来のテレビカメラのダイナミックレンジは $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}$ であり, これは式(4.4)において $n = 1$ の場合すなわち単一の露光条件で撮像する場合のダイナミックレンジ D_1 に相当する. そして, E_1 から E_n までの露光条件でカバーできるダイナミックレンジ D_n は, テレビカメラ自体のダイナミックレンジ D_1 の α^{n-1} 倍となる. 同様に, 光強度に換算した信号と雑音の比が $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ 以上であるダイナミックレンジ $D_{\text{eff } n}$ も, テレビカメラ自体のそれ(すなわち α) の α^{n-1} 倍となる.

以上のように, n 種類に露光条件を変えて撮像してそれらを合成することで, 従来のテレビカメラの α^{n-1} 倍のダイナミックレンジの画像が得られる.

4.3 ダイナミックレンジ拡大画像の合成方法

4.3.1 画像合成アルゴリズム

式(4.2)で示した各々の露光条件 E_i で撮像した画像の画素 (x, y) に対応する出力値を $L_i(x, y)$ (但し, $i = 1, 2, \dots, n$) とすると, ダイナミックレンジが拡大された画像

$L_{\text{wid}}(x, y)$ は、各画像 $L_i(x, y)$ から次のアルゴリズムで求められる。

[アルゴリズム 1]

```

for  $i = 1$  to  $i = n$  do
  for  $(x, y) = (0, 0)$  to  $(X - 1, Y - 1)$  do
    if  $i = 1$  then
       $L_{\text{wid}}(x, y) = L_1(x, y)(E_n/E_1)^\gamma$ 
    else
      if  $L_i(x, y) < L_{\text{sat}}$ 
        then  $L_{\text{wid}}(x, y) = L_i(x, y)(E_n/E_i)^\gamma$ 

```

このアルゴリズムでは、画像 $L_{\text{wid}}(x, y)$ を露光条件 E_1 の画像 $L_1(x, y)$ で初期化した後、各露光条件 E_2, E_3, \dots, E_n の画像について、画素ごとに、飽和レベル L_{sat} 以下か否かを判断し、 L_{sat} 以下の場合にはその露光条件の画像の画素値を画像 $L_{\text{wid}}(x, y)$ の該当画素の値として採用する。このとき、各画像は露光条件の違いにより相対的に感度が異なるので、露光条件 E_n の感度に規格化するために、係数 $(E_n/E_i)^\gamma$ を乗じている。従って、合成によって得られるダイナミックレンジが拡大された画像 $L_{\text{wid}}(x, y)$ は入射光強度 I に対し、 $L_{\text{wid}}(x, y) = (E_n I)^\gamma$ の関係になる。

上記のアルゴリズムが正しく働くためには、テレビカメラが式(4.1)で示された特性を正確に持っていなければならない。しかし、実際のテレビカメラは、CCDでの電荷転送、読みだされた電荷信号の増幅や各種の信号処理など、アナログ的部分が多いので、その特性の変動を完全に避けることは難しい。また、露光条件をシャッタースピードで制御する場合には、移動する対象物を撮像すると、露光期間が完全には一致しないので、それぞれの露光条件の画像で同一画素は対象物上の同一位置には厳密には対応しなくなる。さらに、第5章で述べるように、露光条件の異なる画像を順次撮像する方式を採用した場合にも、移動する対象物の場合に同一画素は対象物上の同一位置には厳密には対応しなくなる。

このような理由から、アルゴリズム 1 を実際のテレビカメラに適用すると次のような問題が発生する。前者のカメラの特性の変動によっては、アルゴリズム 1 における感度規格化の係数 $(E_n/E_i)^\gamma$ が正しい値から外れるので、画像が選択されるか否かが変わる付近で合成画像に撮像場面には存在しない不連続な境目が発生する。また、後者の同一画素が対象物上の同一位置に対応しなくなることによっても、画像が選択されるか否かが変わる付近で合成画像の画素値が急に変化することになるので、合成画像に撮像場面には存在しない不連続な境目が発生する。

これらの問題を解決するために、アルゴリズム1を次に示すアルゴリズム2のように改良する。

[アルゴリズム2]

```

for  $i = 1$  to  $i = n$  do
  for  $(x, y) = (0, 0)$  to  $(X - 1, Y - 1)$  do
    if  $i = 1$  then
       $L_{\text{wid}}(x, y) = L_1(x, y)(E_n/E_1)^\gamma$ 
    else
       $L_{\text{wid}}(x, y) = f_w(L_i(x, y)) L_i(x, y) (E_n/E_i)^\gamma$ 
         $+ \{1 - f_w(L_i(x, y))\} L_{\text{wid}}(x, y)$ 

```

ここで、 f_w は、画像を合成するときの重み関数である。前述の画像合成のアルゴリズムでは、画素値 $L_i(x, y)$ が L_{sat} 以下か否かによってその画像の画素値を採用するか否かが変わる。これに対し、本アルゴリズムでは、画素値 $L_i(x, y)$ によって決まる重み係数 $f_w(L_i(x, y))$ を用いて、 L_{sat} からの差に応じてその画像を重み付けして合成している。このように画素値の選択度合を徐々に変えるので、対象物に動きがある場合や撮像装置のガンマ特性の変動がある場合にも、合成画像の画素値が急に変化することはない。こうすることで、不連続な撮像画像が発生することを防止できる。

重み関数 f_w はここでは以下のようにして決める。3.1節で示したように、露光条件 E_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) でカバーされる光強度範囲において、撮像装置出力の入射光強度に換算した信号と雑音の比の最小値は $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ である。そこで、上記アルゴリズムで合成される画像のこの光強度範囲における信号と雑音の比が $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ 以上になることを条件に、画像合成に用いる重み関数 f_w を決める。

露光条件 E_i でカバーされる光強度範囲の合成画像の画素値を露光条件 E_i および E_{i-1} の画像から合成するとき、画像合成によって雑音も加算的に合成されると考えると、合成画像の雑音 N は、光強度に換算して、

$$f_w(L)L_{\text{noi}}^{1/\gamma}/E_i + \{1 - f_w(L)\}L_{\text{noi}}^{1/\gamma}/E_{i-1}$$

となる。従って、信号 S にあたる光強度 I は $L^{1/\gamma}/E_i$ であることから、合成画像の光強度に換算した信号と雑音の比 S/N は、

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{L^{1/\gamma}/E_i}{f_w(L)L_{\text{noi}}^{1/\gamma}/E_i + \{1 - f_w(L)\}L_{\text{noi}}^{1/\gamma}/E_{i-1}} \\ &= \left(\frac{L}{L_{\text{noi}}}\right) \frac{1}{f_w(L) + \{1 - f_w(L)\}\alpha} \end{aligned} \quad (4.6)$$

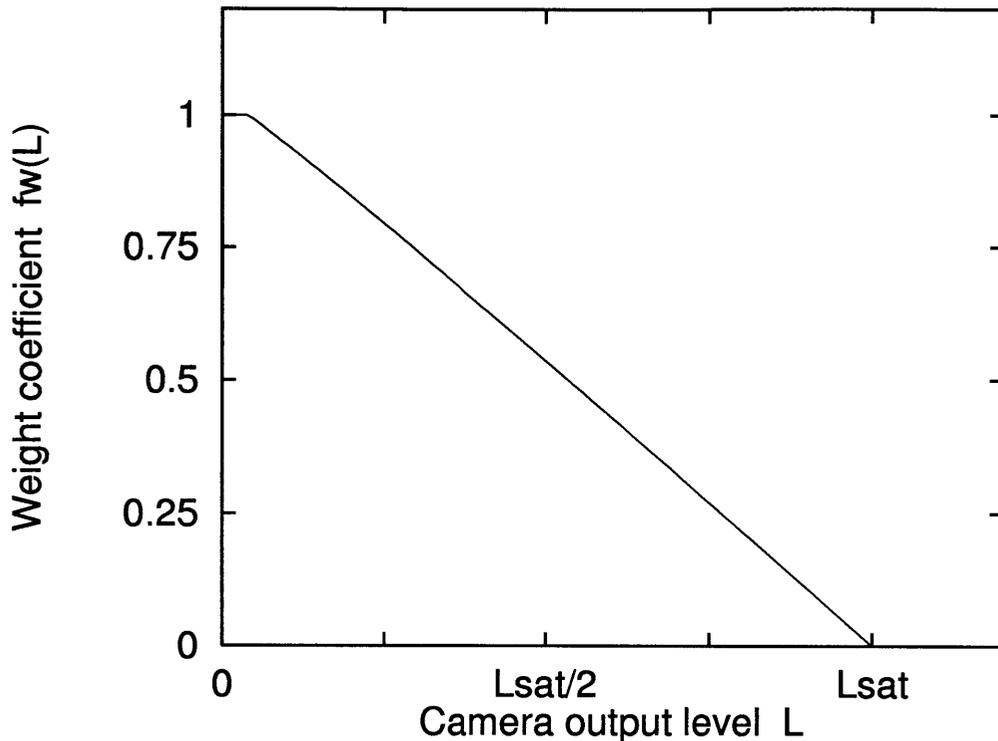


図 4.2 $\alpha = 30.1$, $\gamma = 0.95$ のときの重み関数 f_w

となる。これが、 $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ より大きくなるための関数 f_w の条件は、

$$f_w(L) \geq \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\left(\frac{L}{L_{\text{sat}}} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) \quad (4.7)$$

である。露光条件 E_i と E_{i-1} の画像が重ね合わされる範囲が広く、かつその重みが緩やかに変化するほど、前述した不連続の発生を抑えることができる。そこで、重み関数 f_w には次の関数を用いる。

$$f_w(L) = \begin{cases} 1 & (L < L_{\text{sat}}/\alpha^\gamma) \\ \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\left(\frac{L}{L_{\text{sat}}} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) & (L \geq L_{\text{sat}}/\alpha^\gamma) \end{cases} \quad (4.8)$$

図 4.2 に、 $\alpha = 30.1$, $\gamma = 0.95$ の場合について、この重み関数を示す。

4.3.2 アルゴリズムの検証実験

(a) 実験方法

前述した画像合成アルゴリズムの効果を検証するために、単純な画像選択による合成方法であるアルゴリズム 1 と、重み関数による合成を行うアルゴリズム 2 とについ

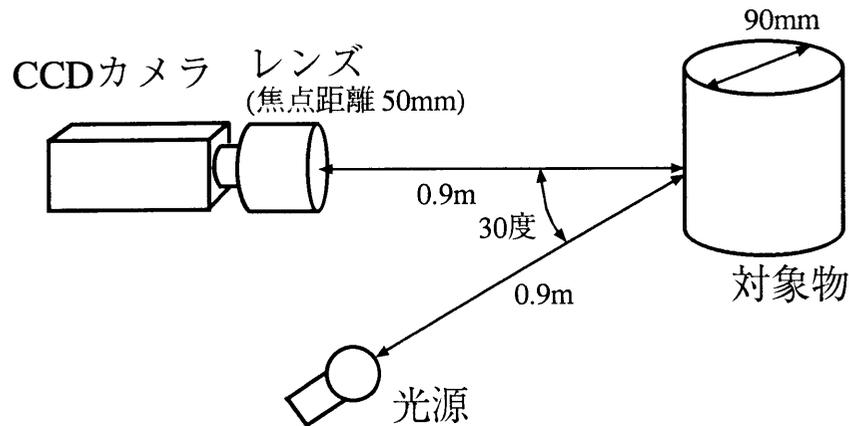


図 4.3 実験方法

て、以下のような実験を行った。

図 4.3 に実験方法を示す。実験室内において、焦点距離 50mm のレンズで、0.9m 先の対象物を、CCD テレビカメラによって撮像した。対象物は、直径 9cm の円筒の表面に白色の上質紙を張ったもので、正面方向から照明し、表面が明るい部分から暗い部分まで滑らかに変化するようにした。対象物の明るさが 2 つの露光条件の画像にまたがるように、カメラレンズの絞りを設定した。

テレビカメラのシャッタースピードを、露光時間が $1/87$ 秒および $1/2620$ 秒となるようにして、2 種類の露光条件の画像を撮像した。CCD カメラのガンマ特性の変動に対する影響を調べるために、 γ の値を実際には $\gamma = 0.95$ (実測値) であるのに対して $\gamma = 1.05$ として、アルゴリズム 1 およびアルゴリズム 2 の各々によって、2 種類の露光条件の画像の合成を行った。

また、対象物の動きに対する影響を調べるために、カメラをカメラ三脚上で 2 つの露光条件の画像間のずれが約 2 画素になるように回転させて 2 種類の露光条件の画像を撮像し、各々のアルゴリズムで画像の合成を行った。

(b) 実験結果

図 4.4 に、カメラを固定して画像間の位置ずれがない状態で撮像した場合 (a) と、カメラを回転させて位置ずれを発生させて撮像した場合 (b) について、 $1/87$ 秒 (図中の下段) および $1/2620$ 秒 (図中の上段) の露光時間での撮像画像をそれぞれ示す。これらの画像を、アルゴリズム 1 およびアルゴリズム 2 によって 1 枚に合成した結果得られた画像を、図 4.5 に示す。同図において、(a)、(b) および (c) はアルゴリズム

1による画像, (d), (e)および(f)はアルゴリズム2による画像である. そして, (a)と(d)は位置ずれのない撮像画像を正しいガンマ値0.95で合成した画像, (b)と(e)はカメラを画素位置をずらした撮像画像から正しいガンマ値0.95で合成した画像, (c)と(f)はカメラのガンマ特性が変動した場合を模擬して位置ずれのない撮像画像を $\gamma = 1.05$ として合成した画像である. なお, これらの画像は, テレビカメラの画像サイズの1/4の部分(すなわち 282×121 画素)である.

図4.6は, 画像の濃淡変化を見やすくするために, 図4.5の各画像を濃淡の空間微分を行う Sobel オペレータを用いてエッジ強調したものである. 同図(a)(d)から分かるように, 位置ずれのない撮像画像を正しい γ 値を用いて合成した場合には, いずれのアルゴリズムでも問題は生じていない. 一方, 位置ずれが存在したり γ 値が正しい値からずれた場合には, 同図(b)(c)のアルゴリズム1による画像では情景には存在しない境目(図中に矢印で示した部分)が現れているのに対し, (e)(f)のアルゴリズム2による画像ではこのような境目はほとんど発生していないことが分かる. これらの実験結果が示すように, アルゴリズム2を用いることにより, 実際のテレビカメラの画像を安定して画像合成することが可能となる.

4.4 結言

ダイナミックレンジの広い画像センシングを目的に, 異なる露光条件の撮像画像の合成によってダイナミックレンジを拡大する原理を示し, α 倍ずつ n 種類に露光条件を変えて撮像してそれらを合成することで, テレビカメラ自体のダイナミックレンジの α^{n-1} 倍のダイナミックレンジの画像が得られることを示した. 画像合成のアルゴリズムを検討し, 特性変動が避けられない実際のテレビカメラでも良好に働く合成アルゴリズムを示し, 実験によりその有効性を検証した. 以上により, テレビカメラのダイナミックレンジを拡大した, ダイナミックレンジの広い画像センシング方法を示した.

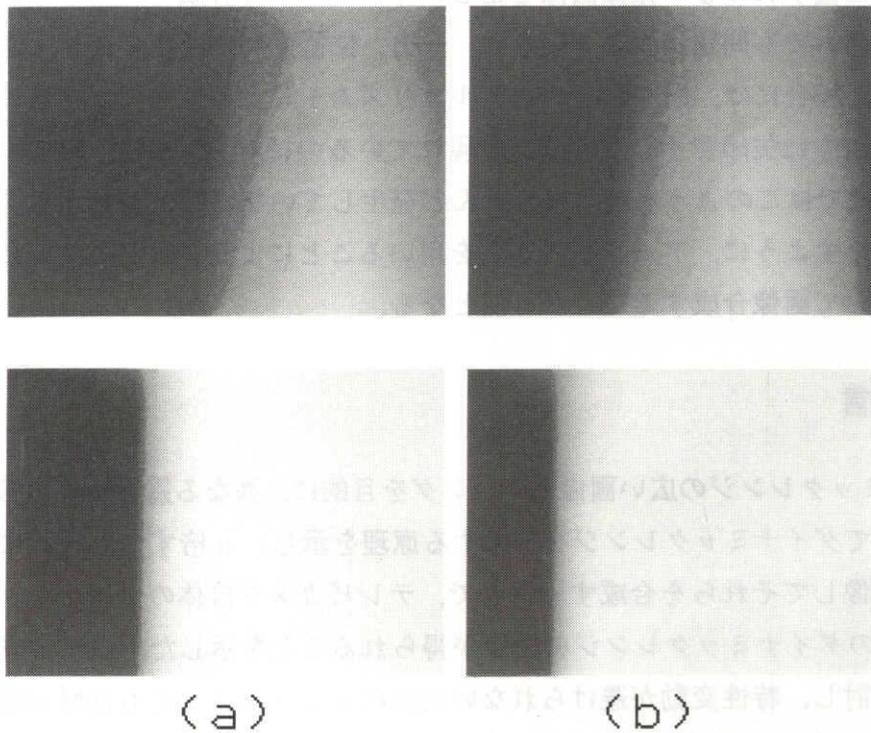


図 4.4 撮像した生画像：上段は露光時間が $1/2620$ 秒の画像。下段は露光時間が $1/87$ 秒の画像。(a) は画像間の位置ずれがない場合、(b) は画像間の位置ずれがある場合。

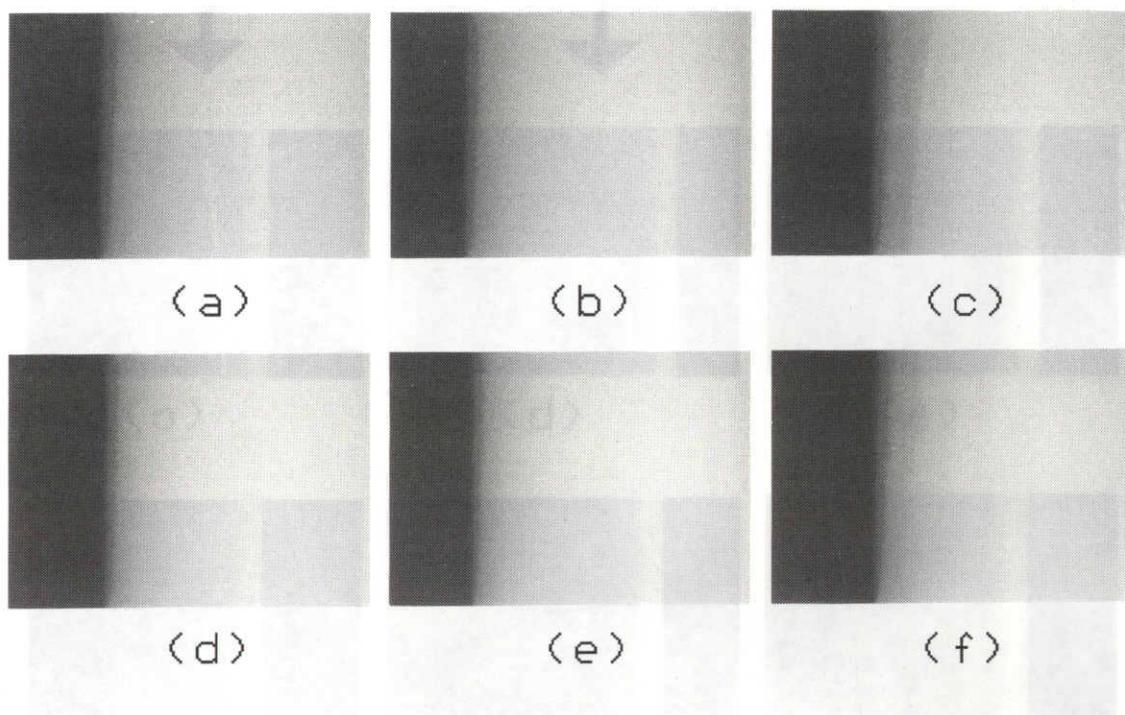


図 4.5 実験結果：アルゴリズム 1 による画像 (a)(b)(c) とアルゴリズム 2 による画像 (d)(e)(f) の比較. (a) と (d) は位置ずれのない撮像画像を正しいガンマ値 0.95 で合成した画像, (b) と (e) は画素位置をずらした撮像画像から正しいガンマ値 0.95 で合成した画像, (c) と (f) は位置ずれのない撮像画像をガンマ値 1.05 で合成した画像

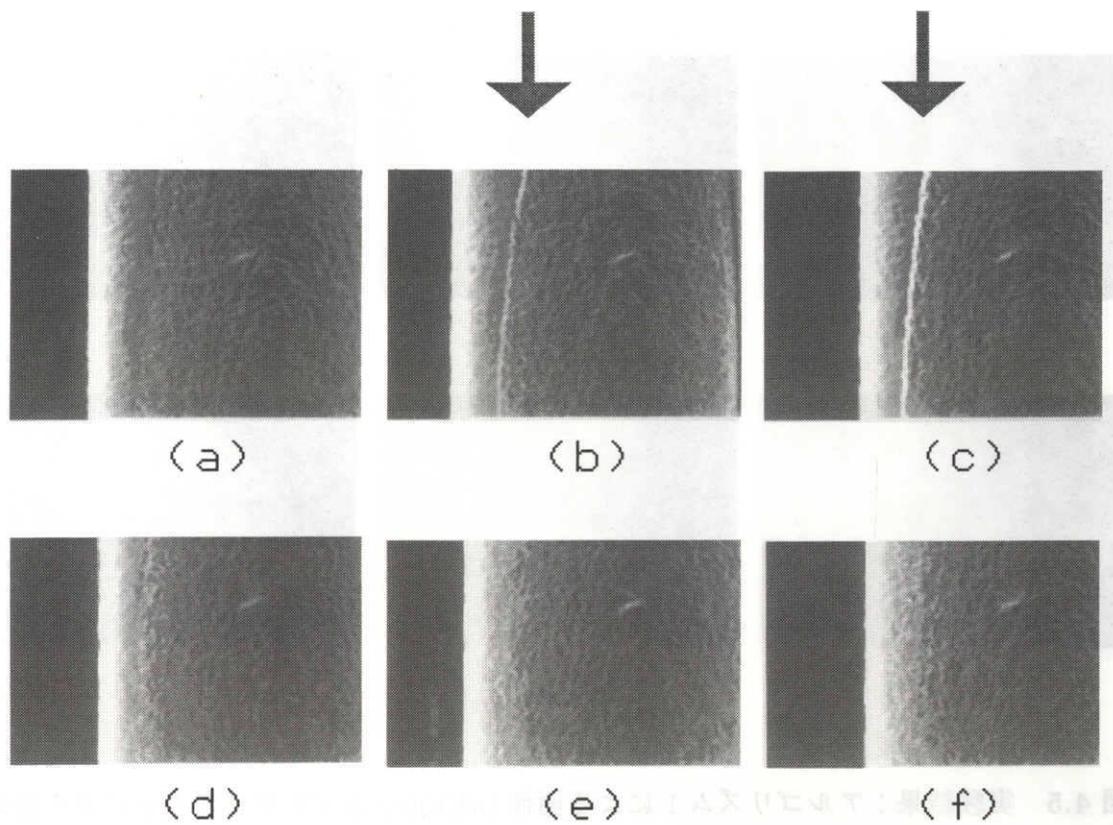


図 4.6 図 4.5 の画像の Sobel オペレータによるエッジ強調結果. アルゴリズム 1 による画像 (a)(b)(c) とアルゴリズム 2 による画像 (d)(e)(f) の比較. 矢印で示したのは, アルゴリズム 1 によって合成したときに発生する, 情景には存在しない境目.

第 5 章

屋外走行環境認識のための視覚システム

5.1 緒言

前章では、照明環境が整備されていない下でも情報を欠落させることなく画像をセンシングできるようにすることを目的に、明るさのダイナミックレンジが広い画像センシング方式を提案した。本章では、この画像センシング法を、自動車の走行環境認識のための視覚へ適用する。

自動車の知能化や予防安全の観点から、ドライバの運転支援を目的とした走行環境認識のための車載システムの研究開発が積極的に行われている [33] [34] [35] [36] [38] [40] [41]。これらのシステムは、自動車の搭載したテレビカメラなどを用いて、道路の走行レーンや前方の走行車両あるいは路上障害物などを認識して、ドライバの安全向上を図るシステムである。このシステムに入力される屋外道路情景は、昼間の走行環境に限定しても、太陽の直射光で照らされた路面、トンネル内や種々の陰などに代表されるように、明るさの範囲が非常に広い。システムへの画像入力にはテレビカメラが用いられるが、屋外情景の入力には従来のテレビカメラの明るさのダイナミックレンジは不足している。このため、さまざまに変化する屋外環境の良好な撮像画像を得ることが難しいという問題がある。そこで、走行環境認識のためのシステムの実現には、屋外の明るさの広い範囲に対応できるダイナミックレンジをもつ視覚センサが必要とされる [46] [47] [34]。さらに、この視覚センサは、移動する物体の連続画像を撮像できることが欠かせない。

本章では、道路環境における明るさの大きな変化に対応した、自動車の屋外走行環境認識のための視覚システムについて述べる。最初に、走行環境認識のために必要とされるダイナミックレンジを示す。次に、モノクロテレビカメラのダイナミックレンジを第4章で述べた方式によって拡大する具体的な実現方式について検討し、その方式に基づいて試作した視覚センサの構成と性能を示す。さらに、この視覚センサを用

いた車載実験によって、視覚システムのダイナミックレンジ拡大の効果と残された課題を明らかにする。

5.2 屋外走行環境認識に必要なダイナミックレンジ

走行環境における認識対象としては、道路の白線や道路端、標識、他車、路上障害物および歩行者などがある。環境認識のためのシステムでは、これらの対象を、昼夜およびあらゆる気象条件下で認識できることが理想である。しかし、現状ではそれに対応できるセンシング技術が開発されていないので、ここでは、センシングに可視光の画像が利用できる、日の出から日没までの日中に環境条件を限定することにする。

テレビカメラで検出する光強度は対象物の輝度に相当するので、屋外走行環境認識に必要なダイナミックレンジの条件を明確にするために、道路走行時に遭遇する種々の対象物の輝度を、薄暮時を含む日中のさまざまな日照条件下で調査した。なお、テレビカメラ等のダイナミックレンジは、検出できる最大光強度と最小光強度の比で定義することとする。輝度の測定は、車載のテレビカメラから対象物を撮像する場合を想定して、約1.6mの高さから俯角5度で行った。図5.1は、この結果をまとめたものである。同図において、輝度が最も高いのは日向の白線で約 1×10^4 cd/m²、最も低いのは薄暮時およびトンネル内の路面で数 cd/m² であり、両者の比は約 10^4 である。従って、 10^4 のダイナミックレンジがあれば、日中のさまざまな条件下で道路環境の対象物を撮像することができる。

カメラの感度について考えると、薄暮条件下の輝度についても、従来のテレビカメラで撮像可能である。従って、従来のテレビカメラの撮像素子を用いることを前提に考えると、暗い側は従来のままで、明るい側の撮像範囲を拡大することが必要とされる。

以上の結果より、開発する視覚システムの目標仕様は、感度は従来のテレビカメラと同等で、ダイナミックレンジを 10^4 に拡大することとした。

5.3 広いダイナミックレンジを持つ視覚システム

5.3.1 露光条件の異なる画像の撮像方法

同一場面を異なる露光条件で撮像する方法としては、入射光を分割して複数の撮像素子により各露光条件で同時に撮像する方法と、単一の撮像素子で順次露光時間を変化させて撮像する方法とが考えられる。前者は、各露光条件で完全に同一場面の画像を得ることができるが、各画像がそれぞれ異なる撮像素子で撮像されるために素子の

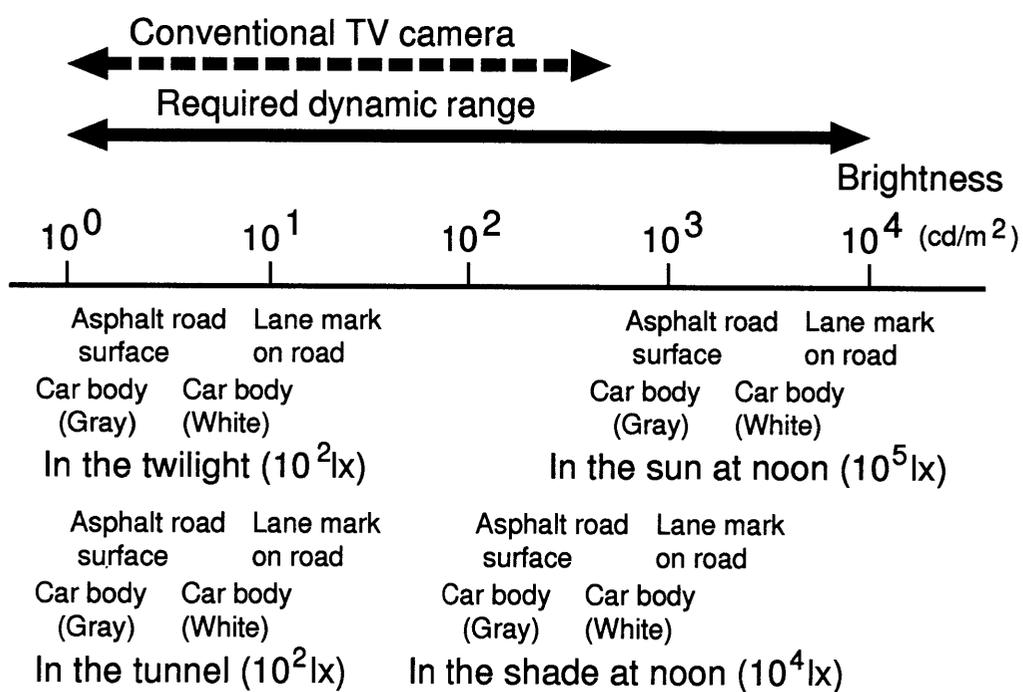


図 5.1 道路環境に存在する種々の対象物の輝度とそれらの撮像に必要なとされるダイナミックレンジ

画素ごとの感度の違いの影響を受けたり、入射光を分割するための光学系によるフレアが原因で画像精度の低下を生じる問題点がある。一方、後者は、異なる露光条件で順次撮像するので、対象物が高速に動いている場合には、そのままでは撮像画像にぶれを生じる可能性があるが、撮像の時間間隔を十分に短くすることでこの問題は解決できると考えられる。また、入射光を分割するための光学系が不必要なので、フレアが発生しにくいことに加え、構成が簡単になる特長がある。そこで、後者の方法を採用することにする。

異なる露光条件で撮像するのに、電子シャッター機能付きの CCD カメラを用いる。これを用いると、短い間隔で各露光条件の画像を順次撮像することができる。露光条件を2種類に変える場合、次節で述べるように、約 1/60 秒の間に2種類の露光条件の画像を撮像することができる。従って、CCD カメラを電子シャッター機能なしで使用するときの1フィールドの露光時間である約 1/60 秒とほぼ同じ時間で、2種類の露光条件の画像を撮像できることになる。

5.3.2 視覚システムの構成

第4章で示した原理を用いて、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大する視覚センサを試作した。そのブロック構成を図 5.2 に示す。視覚センサは、各露光条件の画像を撮像する CCD モノクロテレビカメラ (SONY 製 XC-75) と、撮像した各露光条件の画像からダイナミックレンジを拡大した画像を合成する処理ハードウェアとから構成される。各露光条件の画像は、前述のように、CCD カメラの電子シャッター機能を利用し、露光時間の変化によって撮像している。処理ハードウェアでは、CCD カメラの映像出力信号を 256 階調にデジタル化し、これに同期してリアルタイムで画像合成処理を実行する。図 5.3 は、本視覚システムの外観である。

図 5.4 に、露光条件が2種類の場合の動作タイミングチャートを示す。CCD カメラの電子シャッター速度をフィールド単位で変化させることで、1/60 秒ごとに各露光条件の画像を撮像している。CCD カメラはフィールド蓄積で露光しノンインタレース走査 (図 3.8 参照) で読み出している。露光条件を2種類に変化させる場合、図 5.4 に示したように露光条件の短い方を先に撮像することで、約 1/60 秒の間に2種類の露光条件の画像を撮像できる。そして、2/60 秒ごとに合成された画像が得られる。

画像の合成は、CCD カメラから各露光条件の画像が得られるごとに、それ以前までに合成した画像に新たな画像を順に合成していくことで行われる。第1番目の露光条件で撮像した画像はそのまま画像メモリに記憶される。2番目以降の露光条件で撮像した画像は画像メモリに記憶されている画像と合成計算を行い、その結果を再び画

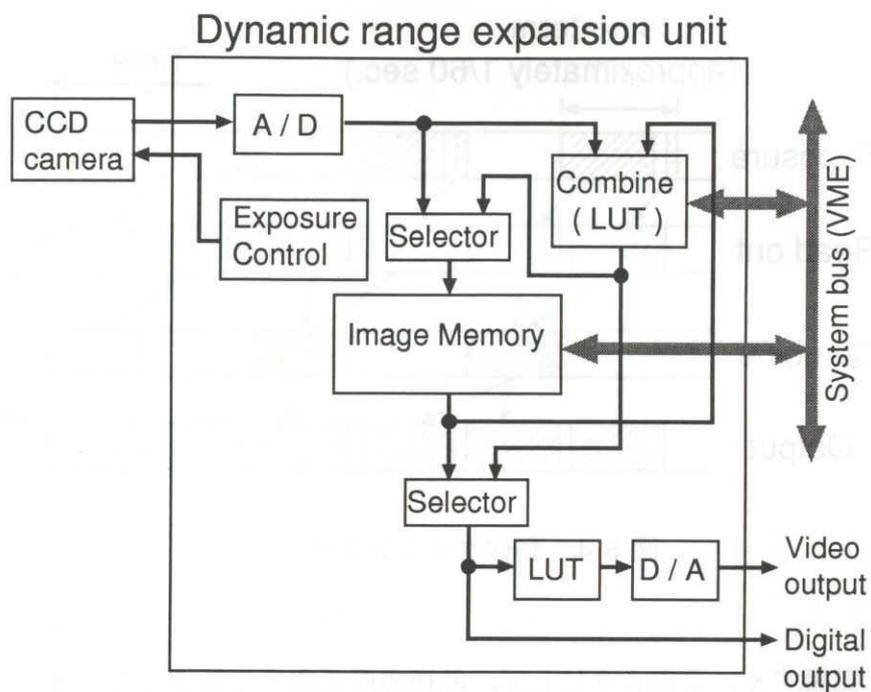


図 5.2 視覚システムのブロック構成

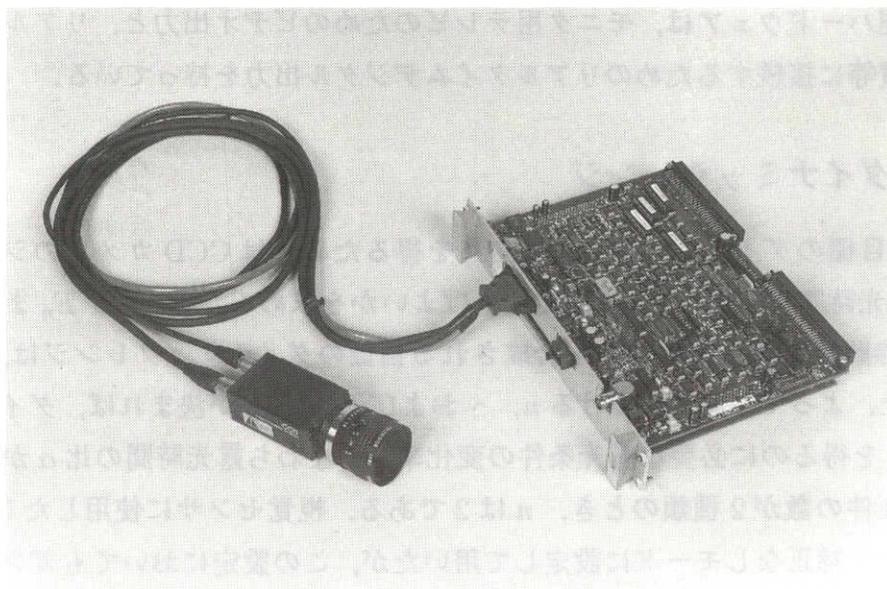


図 5.3 視覚システムの外観

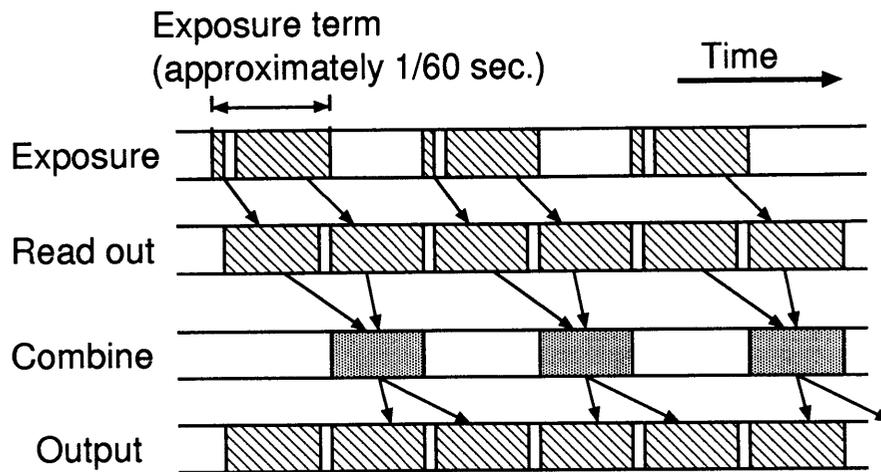


図 5.4 動作タイミングチャート

像メモリに記憶する。このようにして、最後の露光条件で撮像した画像と画像メモリに記憶されている画像との合成計算で、広ダイナミックレンジ画像が得られる。合成計算は、高速化を図るため、ルックアップテーブル方式を採用している。ルックアップテーブル方式であるので、CCDカメラ出力の非直線性の補正も含めて合成を行い、広ダイナミックレンジ画像が光強度に対して直線性を持つようにできる。画像メモリ上の広ダイナミックレンジ画像は、VMEバスを介してホスト計算機からアクセスできる。処理ハードウェアは、モニター用テレビのためのビデオ出力と、リアルタイム画像処理装置等に接続するためのリアルタイムデジタル出力を持っている。

5.3.3 ダイナミックレンジ

まず、目標のダイナミックレンジ 10^4 を得るためには CCD カメラのシャッタスピード (露光時間) をどのように設定すればよいかを求める。 E_1 から E_n までの n 種類の露光時間で撮像した画像から合成される画像のダイナミックレンジは、式 (4.4) で表された。よって、同式における n 、 γ および $L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}}$ が決まれば、ダイナミックレンジ D_n を得るのに必要な露光条件の変化率、すなわち露光時間の比 α が求められる。露光条件の数が 2 種類のとき、 n は 2 である。視覚センサに使用した CCD カメラは、ガンマ補正なしモードに設定して用いたが、この設定においてもガンマ値が完全に 1 にはならず、実測の結果 $\gamma = 0.95$ であった。また、CCD カメラの映像出力信号の S/N はカタログ値で約 630 であるが、本視覚センサでは出力信号を 256 階調にデジタル化して処理しており $L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}}$ は主にこの量子化雑音により決まるので、

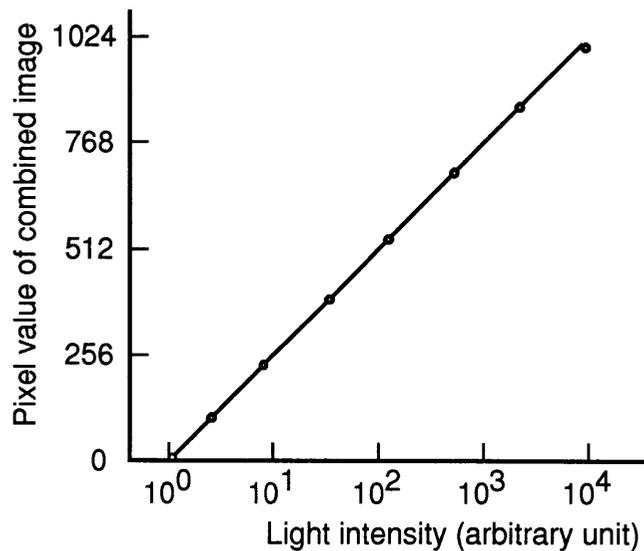


図 5.5 視覚センサのダイナミックレンジ特性

$L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}} = 255$ となる。式(4.4)にこれらのパラメータを代入してダイナミックレンジが 10^4 となる条件を求めると、露光条件の変化率 α が 29.3 となる。なお、CCD カメラ自体の性能に相当する図 4.1 の I_n のダイナミックレンジは、式(4.4)の D_1 に相当し、 $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}$ すなわち 3.4×10^2 である。

露光時間の比がほぼ 29.3 になる組合せとして、2種類の露光時間を 1/87 秒と 1/2620 秒（このときの変化率 α は 30.1）に設定し、このときの視覚センサの明るさの入力ダイナミックレンジを測定した。図 5.5 に、視覚センサへの入射光強度と広ダイナミックレンジ画像の画素値との関係の測定結果を示す。同図より、ほぼ 10^4 のダイナミックレンジが得られていることが分かる。

5.3.4 その他の性能

この視覚センサの感度は、最も大きい露光条件によって決まる。本視覚センサでは、フィールド単位で撮像しているので、最も長い露光時間はおよそ 1/60 秒であり、従来のテレビカメラの通常の露光時間と同じである。従って、その感度は、従来のテレビカメラとほぼ同じである。

この視覚センサで得られる画像の解像度を従来のテレビカメラと比較すると、以下のようなになる。この視覚センサの水平解像度は 564 で、従来のテレビカメラの画像出力をデジタル化するときの一般的な水平解像度とほぼ同じである。垂直解像度は、CCD

カメラをフィールド蓄積ノンインタレース走査で使用しているため、242 となる。露光条件を 2 種類とする場合、前述のように約 1/60 秒の間に 2 種類の露光条件の画像を撮像できるので、合成画像には約 1/60 秒間の動きが含まれる。従来のテレビカメラの垂直解像度は、フレーム蓄積インタレース走査のとき 485 である。このときには、2 フィールドを合成するので、画像には 1/30 秒間の動きが含まれる。従来のテレビカメラで、画像に含まれる動きを 1/60 秒間にするためにフィールド蓄積ノンインタレース走査とした場合は、垂直解像度は 242 となる。よって、この視覚センサは、従来のテレビカメラと同等の垂直解像度をもつといえる。表 5.1 に、この視覚センサの性能をまとめて示す。

表 5.1 視覚センサの性能

ダイナミックレンジ	1×10^4 †
解像度	564(水平) × 242(垂直) 画素
最低照度	5 lx, F1.4
露光時間	63.6 μ ~ 1/60 秒
露光条件の数	2 ~ 5
各露光の間隔	1/60 秒
バスインタフェース	VME
画像メモリサイズ	1024(水平) × 256(垂直) × 2 バイト
処理ハードウェアボードサイズ	233 × 160 × 40 mm

† 露光条件が 2 種類 (1/87 秒と 1/2620 秒) の場合

5.4 自動車の走行環境認識のための視覚システムとしての有効性

5.4.1 実験方法

自動車の走行環境認識のための視覚システムとしての本方式の有効性を確かめるために、試作した視覚センサを用いて、次のような実験を行った。

図 5.6 および図 5.7 に、そのときの実験システムと車へのカメラの取付け状況を示す。普通乗用車に、比較のための従来式テレビカメラ (本視覚センサに用いたのと同型の CCD カメラ) および試作した視覚センサの CCD カメラを、1.6m の高さに俯角

5度で約10cmの間隔で並べて取付け、同一場面を同時に撮像できるようにした。従来式テレビカメラでは市販のフレームグラバで256階調にデジタル化した画像を、この視覚センサでは処理ハードウェアの画像メモリ上の合成画像を、それぞれデジタルデータとして記録して評価に用いた。なお、従来カメラ(ガンマ補正なしモードに設定)は $\gamma = 0.95$ であったので、これを256階調にデジタル化した画像のダイナミックレンジ D_1 は式(4.4)より 3.4×10^2 である。実験に用いた従来カメラとそれから得られるデジタル画像の性能を表5.2に示す。

表 5.2 実験に用いた従来カメラの特性 (SONY 製 CCD モノクロカメラ XC-75 をアバルデータ製フレームグラバ AVME-338A でデジタル化)

カメラ自体	ガンマ補正	”なし”に設定
	映像出力信号の S/N	630 (56dB)
	動作モード	フィールド蓄積 ノンインタレース走査
デジタル画像	ダイナミックレンジ	3.4×10^2
	解像度	640(水平) × 242(垂直) 画素

天候が晴の日に、高速道路(中央高速道路の小牧東-土岐インターチェンジ間約17km, 区間内に2カ所のトンネルがある)を時速約80kmで走行しながら、従来型のテレビカメラとこの視覚センサとで同一場面を撮像した。走行中には照度も測定した。本視覚センサの2種類の露光時間は、1/87秒および1/2620秒に設定した。従来カメラには、明るさの変化に対応するために、自動絞りレンズ(COSMICAR B2514EX-2)を用いた。自動絞りレンズの絞り感度は、あらかじめ道路を走行してできる限り適切なレベルになるよう調整した。本視覚センサには、固定絞りレンズ(COSMICAR B2514C-2)を用いた。レンズの焦点距離は、共に25mmである。

撮像した画像の品質の評価は、情景の情報が欠落することなく撮像できているかどうかという観点で行った。

5.4.2 実験結果

図5.8は、トンネル出口付近を撮像した画像の一例を示したものである。従来カメラで撮像した画像では前方の部分がハレーションを起こしているが、この視覚センサではハレーションを起こすことなく撮像されている。トンネル出口付近は、太陽が直

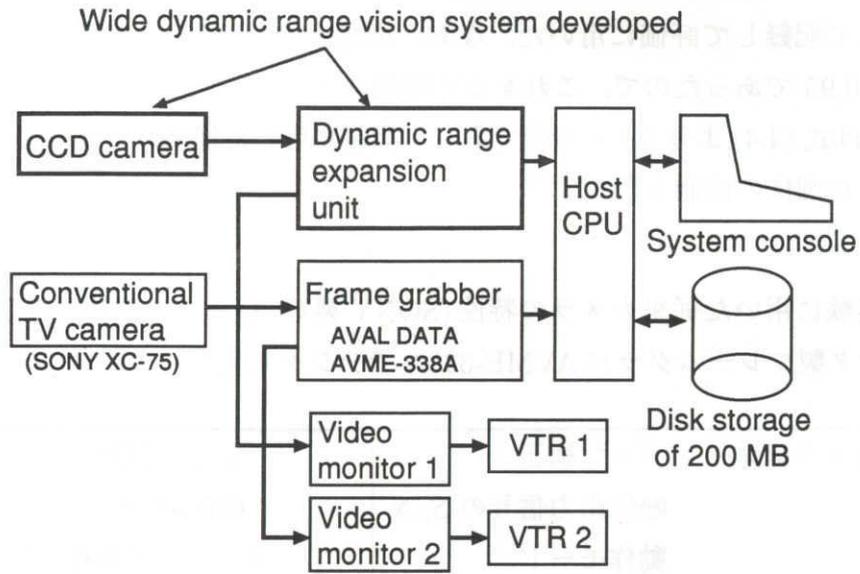


図 5.6 実験システム

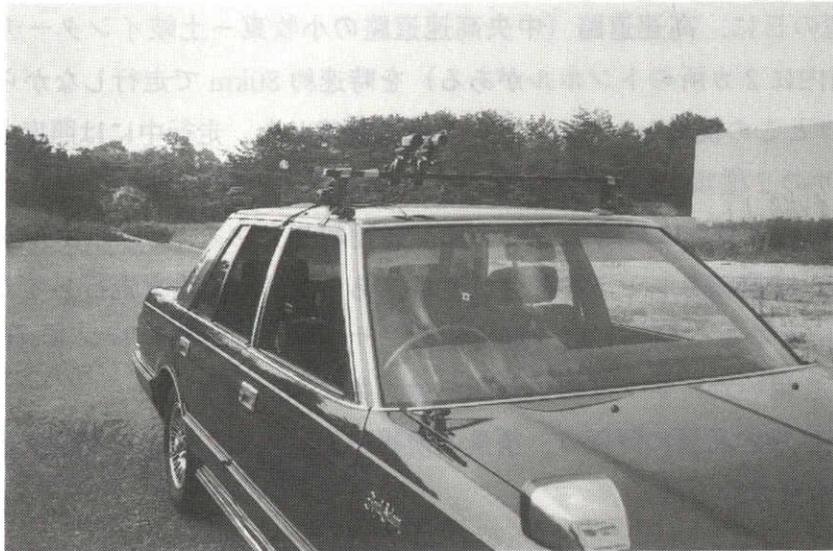


図 5.7 実験車へのカメラの取付け状況

接カメラの視野に入る場合を除くと、最もダイナミックレンジの広い情景であるが、この視覚センサを用いることにより品質の高い画像が得られることがわかる。図 5.9 には他の例として、強い影のある場面の画像を示したが、同図からも本視覚センサの効果が確認される。なお、太陽が直接カメラの視野に入る場合には、太陽光の光強度が路面や白線からの反射光強度に比べて極めて強いため、従来のカメラおよびこの視覚センサのいずれの場合も、レンズのフレアと CCD 撮像素子のスミアの発生が原因で適切な画像が得られなかった。また、極めて強い逆光状態においても、レンズのフレアが原因となり、適切な画像が得られない場合があった。図 5.10 は、このような状況の画像の一例である。なお、スミアとは、CCD 撮像素子固有の偽信号で、ある画素に極めて強い光が入射したときに素子基板内深くで発生した光励起電荷が拡散により垂直転送 CCD に達し、画像に光のにじみが発生する現象である [21]。また、フレアとは、レンズなどの表面で反射した光によって画像が乱される現象である。

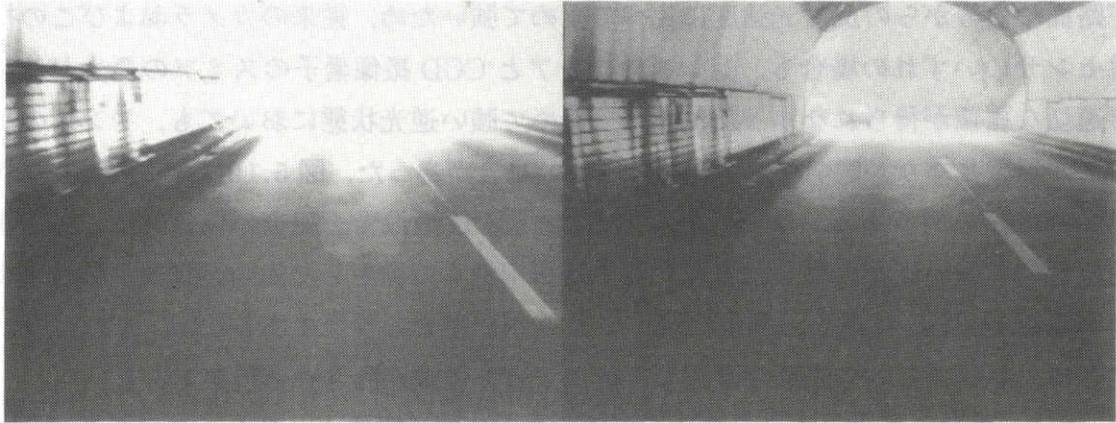
次に、画像の品質の改良の度合を評価するために、従来カメラとこの視覚センサで撮像した画像について、エッジ抽出を行った。図 5.11 に、図 5.8 の各画像を Sobel オペレータを用いてエッジ強調した結果を示す。この結果から、従来のカメラの画像からは白線のエッジの一部しか確認できないのに対し、この視覚センサの画像からはトンネル内部から外部に渡る広い領域で白線のエッジが確認されている。

さらに、この視覚センサを用いることによる画像の改良度合いを定量的に評価するために、従来カメラおよび本視覚センサの撮像画像について、画素値が飽和している割合を計算した。表 5.3 は、図 5.8 に示したトンネル出口付近の画像について、白線とその周り（白線幅の約 3 倍）の領域内で飽和している画素の割合を求めた結果である。同表から、従来のカメラでは画像入力時の情報の欠落があるのに対し、この視覚センサでは情報が欠落することなく画像入力できていることが認められる。

なお、従来のカメラと本視覚センサとで設置位置が約 10cm 離れていることおよび実験装置の制御上の制約から両者の撮像に微妙な時間的ずれが発生することにより、上に示した撮像画像は完全には同一場面になっていない。しかし、これまで示した実験結果から分かるように場面の微妙なずれに比べて視覚センサのダイナミックレンジの違いの効果が充分大であるので、以上の議論に本質的な影響は無いと考えられる。

5.4.3 ダイナミックレンジ拡大の効果の考察

太陽光が直接カメラに入らない場合でも、レンズのフレアなどの影響により、撮像素子上に結像された画像のダイナミックレンジは情景の実際のダイナミックレンジに比べ狭くなる。本節では、図 5.8(b) に示した画像を例に、情景の実際のダイナミック



(a) 従来のテレビカメラ

(b) 本視覚センサ

図 5.8 トンネル出口付近での撮像画像



(a) 従来のテレビカメラ

(b) 本視覚センサ

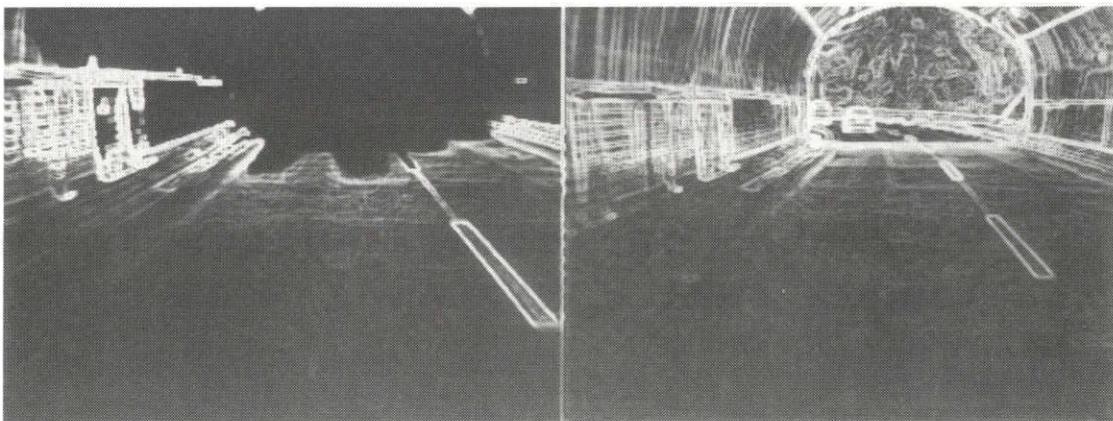
図 5.9 濃い影のある場面の撮像画像



(a) 従来のテレビカメラ

(b) 本視覚センサ

図 5.10 逆光のためにフレアが発生している撮像画像



(a) 従来のテレビカメラ

(b) 本視覚センサ

図 5.11 図 5.8 の画像の Sobel オペレータによるエッジ強調結果

レンジと本視覚センサで得られた画像上でのダイナミックレンジとを比較し、視覚センサのダイナミックレンジを拡大した実効的な効果について考察する。

画像上でのダイナミックレンジを知るために、図 5.8(b) の画像の画素値（レンズのフレア等の影響が含まれる）から、図 5.5 の関係を用いて、トンネル内およびトンネル外の白線および路面の画像上での明るさを求めた。一方、その情景の実際のダイナミックレンジを知るために、トンネル内外の白線と路面の実際の明るさ（輝度）の関係を、別に測定した白線と路面の輝度の比と走行中に測定したトンネル内外の照度とから求めた。なお、白線と路面の輝度の比は約 3 倍で、トンネル内およびトンネル外での照度が約 1×10^2 lx および約 5×10^4 lx であった。図 5.12 に、このようにして得られた明るさの関係を示す。これらの明るさは、トンネル外の白線の明るさで規格化してある。

同図から分かるように、図 5.8 の情景の実際のダイナミックレンジは 1.5×10^3 であるのに対し、画像上でのダイナミックレンジは 2.7×10^2 である。前述のように、従来カメラから得られるデジタル画像のダイナミックレンジは 3.4×10^2 であったので、もし瞬時の情景の明るさに合うように従来カメラのシャッタースピードを制御できれば、図 5.8 のトンネル出口の情景の画像上の明るさも、従来カメラのダイナミックレンジに収めることが可能であると考えられる。

しかし、シャッタースピードを高速制御する方法で得られる画像は、図 5.8 のようにダイナミックレンジの広い情景では、画像の暗い部分で S/N が低下する問題がある。例えば、光強度に換算した信号と雑音の比が $(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}/\alpha$ 、すなわち $255^{1/0.95}/30.1 = 11$ 以上であるダイナミックレンジは、式 (4.5) より、本視覚センサでは 9×10^2 であるのに対し、従来カメラでは 3×10^1 である。図 5.8(b) の画像上でのダイナミックレンジは 2.7×10^2 であったので、従来カメラでは 3×10^1 を超えるレンジで S/N が低下することになる。一方、本視覚センサで得られる画像の S/N は、前述したように、

表 5.3 図 5.8 の画像において、白線とその周り（白線幅の約 3 倍）の領域内で飽和している画素の割合

画像内での場所 (車からの距離)	トンネル内 (~ 20m)	出口付近 (20 ~ 40m)	トンネル外 (40m ~)
本視覚センサ	0 %	0 %	0 %
従来のテレビカメラ	0 %	14 %	100 %

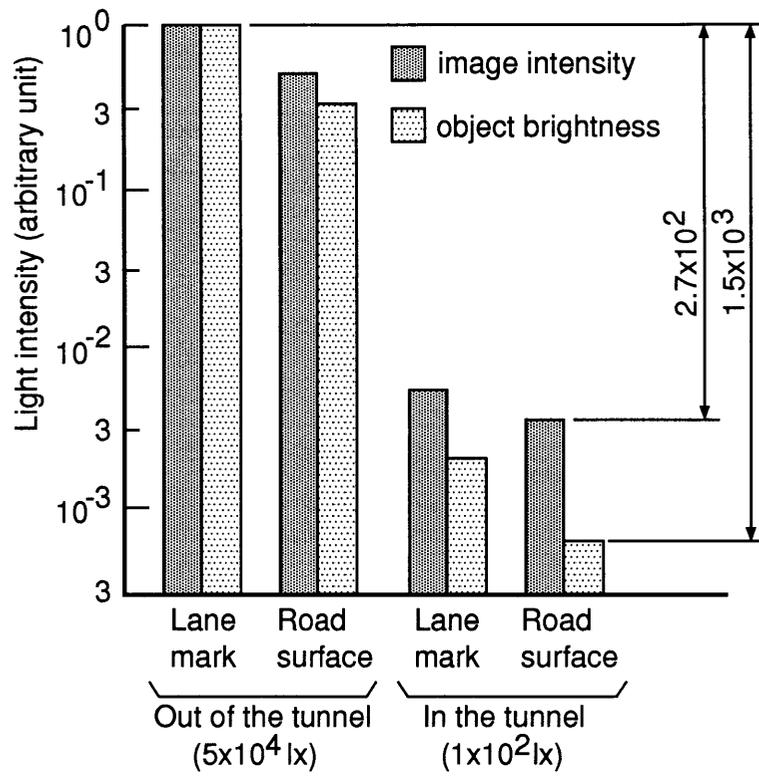


図 5.12 図 5.8 (b) の画像の明るさと実際の対象物の明るさ

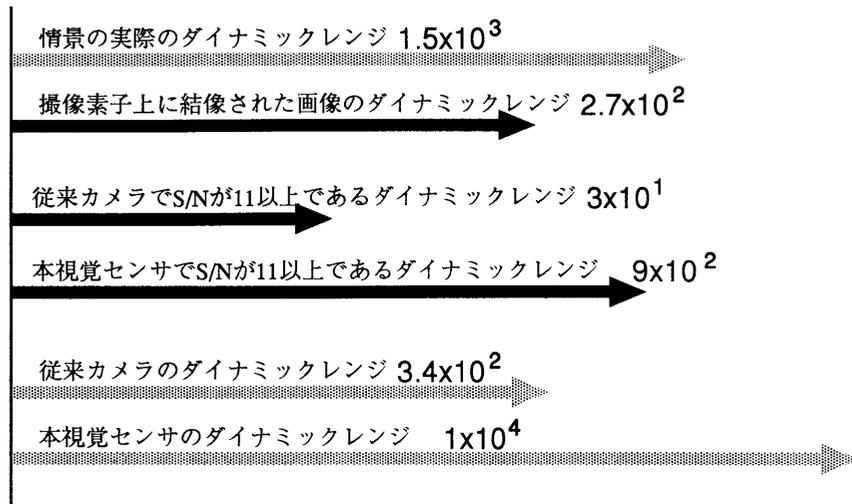


図 5.13 図 5.8 の情景のダイナミックレンジと，従来のテレビカメラおよび本視覚センサのダイナミックレンジの比較

2.7×10^2 よりも広いダイナミックレンジに渡って 11 となる。以上の関係をまとめたのが，図 5.13 である。

以上に述べたことから，露光条件を変えた複数の画像の合成によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大する方法が，屋外走行環境認識にの画像センシングに有効であることが示された。

5.5 結言

自動車の走行環境認識を目的に，日の出から日没までの日中の走行環境に適用できる，屋外走行環境認識のための視覚システムについて述べた。走行環境認識のためには， 10^4 のダイナミックレンジが必要とされた。シャッタスピードの異なる画像を単一の撮像素子で順次撮像し，第 4 章で述べた方式によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大した，視覚センサを試作した。移動物体の連続画像の撮像を可能にするために，シャッタスピードの異なる画像を短い時間間隔で撮像し，これらの画像の合成処理を実時間でを行うために，専用のハードウェアを開発した。この視覚システムによる実走行による評価実験の結果，太陽光がカメラに直接入射する場合を除いて，従来のテレビカメラに比べて良好な画質の画像が得られた。そして，屋外のさまざまな照明条件においても対象物のエッジが確実に抽出できることを示し，ダイナミックレンジを拡大した視覚システムの有効性を確認した。

第 6 章

部品位置決め視覚システム

6.1 緒言

前章では、第 4 章で示したダイナミックレンジが広い画像センシング法を、自動車の走行環境認識のための視覚システムへ応用し、その効果と課題を明らかにした。本章では、この画像センシング法を、FA のための部品位置決め用ロボットの視覚へ適用する。

FA 分野におけるマシンビジョンでは、画像から所定のパターンを認識することが基本的な問題であり、これまで種々の手法が開発され、位置決めロボットの視覚 [48] をはじめ多くの視覚システムに実用化されてきた [49, 50]。しかし、これらの視覚システムを工場で安定に動作させるためには、照明環境の整備に多大な労力を要しているのが現状である。例えば、工場内に窓や出入口から太陽光が入射してくる場合には、視覚システムの周りを囲って遮光するなどの方法が採られている。また、照明環境は季節や時間の推移に伴って変動するため、視覚システムの性能を保つためには照明を随時調整することが必要となる。さらに、対象物が金属製部品の場合には、鏡面反射の影響が強いため、照明の明るさの変化だけでなく、光の方向の多少の変化によっても画像の明るさが著しく変化して照明環境の変動の影響を強く受ける。このような問題の解決のために、視覚システム自体を照明環境の変動に強くする技術の開発が強く望まれている。

視覚システムが照明環境の変動に弱い原因としては、次の 2 点が挙げられる。その 1 つは、画像処理アルゴリズムが照明環境の変化に対して弱いこと、もう 1 つは、画像の撮像に用いられるテレビカメラのダイナミックレンジが撮像対象の明るさの変化に比べて不足していることである。

前者の処理アルゴリズムに関しては、数々の試みがなされている。FA 分野で用いられる画像処理アルゴリズムは、従来は、計算量の点から、処理の初期段階で入力画

像を 2 値化し、その 2 値画像について特徴量を求める手法 [51] や、パターンマッチングを行う手法 [9] が採用されてきた。効果的な 2 値化しきい値の決定法も開発されている [52] が、照明環境の変化に依存することなく対象と背景を分離するように 2 値化することは一般には困難である。これらに対し、照明環境の変化に比較的強い処理手法として、可変しきい値による動的 2 値化法 [53] や、入力画像とモデル画像との濃淡値の相関を用いる方法 [57] などがある。また、画像の濃淡値から特徴量を求めて照明変動の影響を受けることなく物体の有無を判定する方法 [54] も提案されている。

しかしながら、これらの画像処理アルゴリズムの工夫によっても、テレビカメラのダイナミックレンジ不足によって画像撮像段階でいったん欠落してしまった情報は補うことはできない。従って、前述の問題の根本的な解決には、画像処理アルゴリズムの改良とともに、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大して撮像段階での情報の欠落をなくすことが不可欠であると考えられる。

本章では、工場での照明環境の変動に影響されることなく安定に動作する位置決め視覚システムについて述べる。その実現手段として、照明環境が変化しても画像情報の欠落が生じないように、視覚システムへの画像入力にダイナミックレンジを拡大したテレビカメラを用いる。第 4 章で述べたダイナミックレンジの広い画像センシング方式により、第 5 章では屋外走行環境認識のための視覚システムを開発した。本章では、この視覚センサを部品位置決めのための視覚システムに適用し、その位置決め視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性（頑健性）を実験により評価する。そして、テレビカメラのダイナミックレンジ拡大が、視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性の向上に極めて有効であることを明らかにする。

6.2 部品位置決め視覚システム

6.2.1 工場における照明環境の変動

工場現場での照度測定などの調査結果から、工場における照明環境は、およそ以下の範囲で変動することが分かった。すなわち、照度の変動範囲は 500 lx から 10,000 lx、照明方向の変動範囲は部品が置かれた面に対して 15 度から 90 度である。10,000 lx という照度はおおよそ、工場の窓から入射した太陽光によって直接照らされたときの明るさである。

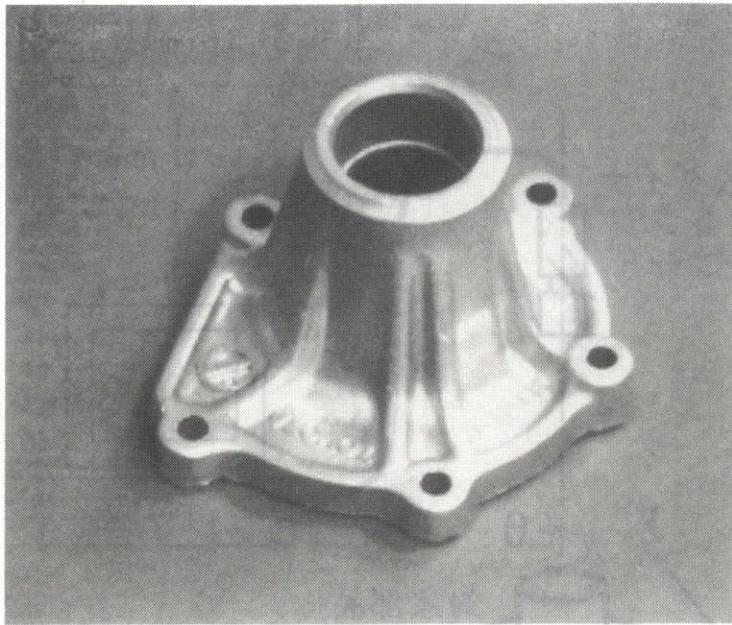


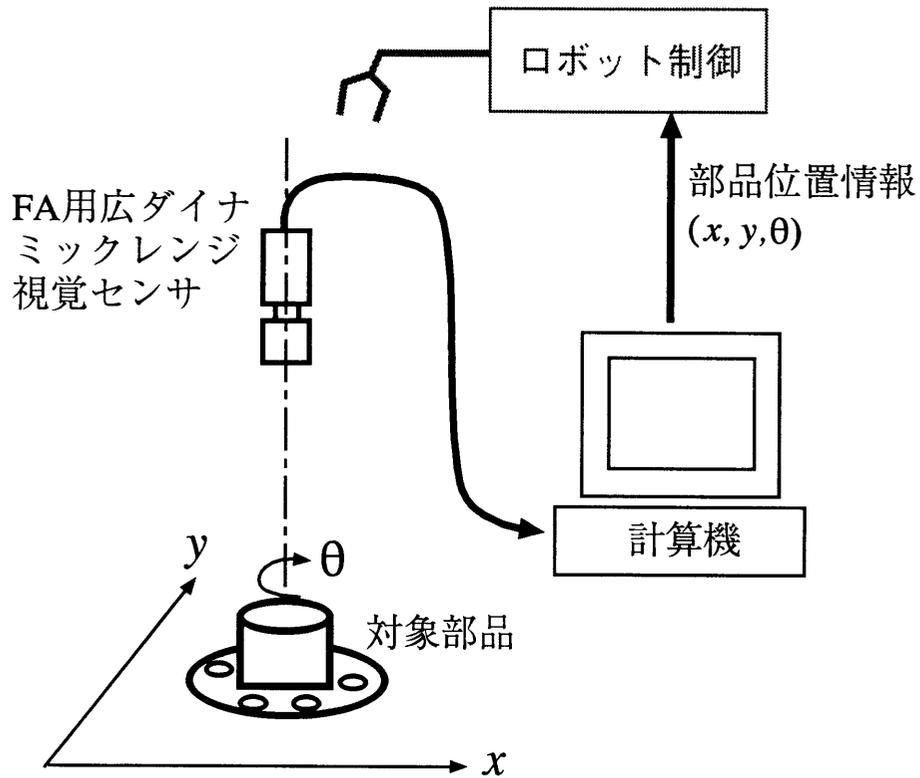
図 6.1 位置決めの対象部品の一例

6.2.2 位置決めの対象部品

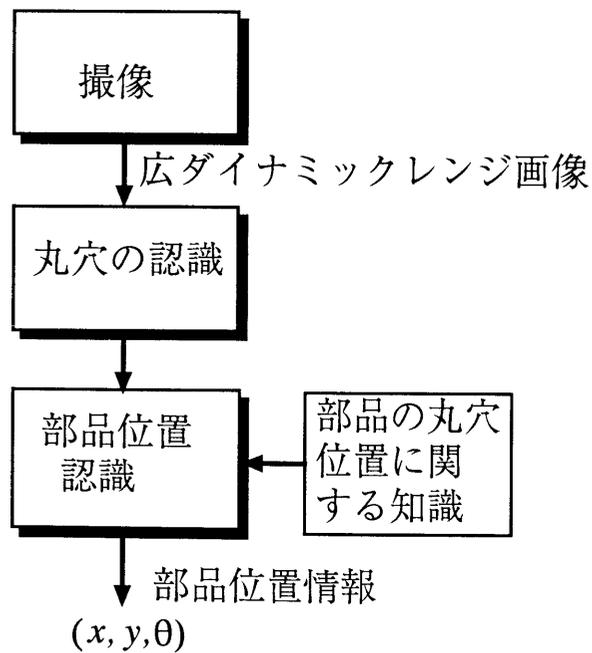
位置決めの対象とする部品の代表例を図 6.1 に示す。これは、アルミ鋳物製の自動車部品で、視覚システムによる位置決めは、部品に開いた丸穴を認識することで行う。部品の大きさは、差渡しが 15 ないし 30cm、高さが 5 ないし 10cm である。部品は平面上に置かれるので、視覚システムが行うのは 2 次元の位置決めである。対象とする部品はこれ以外にも多くの種類があるが、いずれも図 6.1 に示した部品と類似のものである。

6.2.3 位置決め視覚システムの構成

位置決め視覚システムの全体構成を図 6.2 に示す。この視覚システムは、部品を撮像するための広ダイナミックレンジ視覚センサと、撮像画像から部品位置を求めるための計算機とから構成される。部品は反射照明法によって上方から撮像する。部品位置を求める処理は、撮像画像から丸穴を認識し、それらの丸穴の位置を、あらかじめ情報として持っている部品の丸穴位置情報と照合することで行う。



(a) 構成



(b) 処理の流れ

図 6.2 位置決め視覚システム

6.2.4 丸穴の認識アルゴリズム

撮像画像からの丸穴認識には、照明環境の変化の影響を比較的を受けにくい、画像濃淡値の正規化相互相関によるパターンマッチングを用いた。撮像画像を $f(i, j)$ 、検出する丸穴のモデルパターンを $g(u, v)$ とするとき、画像 f とモデルパターン g の正規化相互相関値 $C_{fg}(i, j)$ は、

$$C_{fg}(i, j) = \frac{\sum_u \sum_v (f(i+u, j+v) - \bar{f}(i, j))(g(u, v) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_u \sum_v (f(i+u, j+v) - \bar{f}(i, j))^2} \sqrt{\sum_u \sum_v (g(u, v) - \bar{g})^2}} \quad (6.1)$$

但し、

$$\bar{f}(i, j) = \frac{\sum_u \sum_v f(i+u, j+v)}{\sum_u \sum_v 1}$$

$$\bar{g} = \frac{\sum_u \sum_v g(u, v)}{\sum_u \sum_v 1}$$

である。ここで、 \sum_u および \sum_v における u と v の範囲は、モデルパターン $g(u, v)$ の値が定義されている範囲である。

画像中においてこの相関値 $C_{fg}(i, j)$ がしきい値以上である重心の位置 (i, j) を検出することによって、丸穴の存在位置を求める。丸穴のモデルパターン $g(u, v)$ には、図 6.3 に示したように、丸穴の輪郭に沿って内側を 0、外側を 1 としたパターンを用い、丸穴の輪郭部分の濃淡変化をパターンマッチングするようにした。

6.3 位置決め視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性

本視覚システムの照明変動に対するロバスト性を実験により評価する。本視覚システムは、照明条件が変動しても画像情報の欠落が生じないように、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大するという方法によって、照明変動に強い安定な視覚システムを実現することをねらいとしたものである。照明変動に対応する別の方法として、オートアイリスレンズを用いる方法も考えられる。しかし、外乱光などによる諸々の照明変動に対してアイリスを適切に自動調整することは、実際には極めて難しい問題である。また、照明変動に対するオートアイリスの応答速度は十分とはいえない。さらに、オートアイリスレンズは、工場内での振動や油ミストの影響に対して信頼性が低い。このため、自動車部品の生産工程でオートアイリスレンズが使用されることはほとんどない。以上のことから、実験での本システムの比較対象は、テレビカメラの

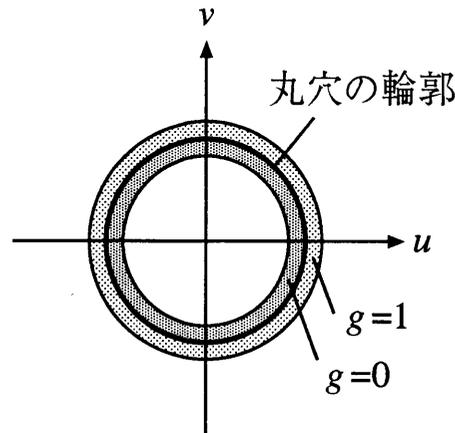


図 6.3 丸穴のモデルパターン $g(u, v)$

ダイナミックレンジ拡大の効果を評価するために、ダイナミックレンジを拡大しない従来のテレビカメラを撮像に用い、本視覚システムと同一の認識アルゴリズムを用いたシステムとした。

6.3.1 実験方法

本視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性を実験により評価した。図 6.4 にその方法を示す。実験には図 6.1 に示した部品を用いた。部品の背景は、ねずみ色の色画用紙とした。照明環境をさまざまに変化させ、部品の丸穴および部品位置の認識結果を調べた。テレビカメラのダイナミックレンジ拡大の効果を知らるために、視覚システムでの撮像に広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた場合と、その代わりに従来のテレビカメラを用いた場合とで、認識結果を比較した。これらの認識処理には、広ダイナミックレンジ視覚センサおよび従来のテレビカメラのどちらにも同一のアルゴリズムを用いた。広ダイナミックレンジ視覚センサでは、露光時間が 1/60 秒と 1/900 秒の 2 種類の画像を合成するようにした。カメラレンズの焦点距離は 50mm、カメラと対象物の距離は 1.45m である。

認識処理に供する画像は、条件を統一するために、広ダイナミックレンジ視覚センサと従来のテレビカメラの両者の場合とも、対数スケールによる 256 階調 (8 ビット) の画像とした。この画像の対数スケールの階調 f_{Log} と線形スケールの階調 f_{Lin} (従来のテレビカメラではもとの階調を 15 倍したもの) の関係を次式に示す。

$$f_{\text{Log}} = 255 \frac{\log(f_{\text{Lin}}/17)}{\log(3840/17)} \quad (6.2)$$

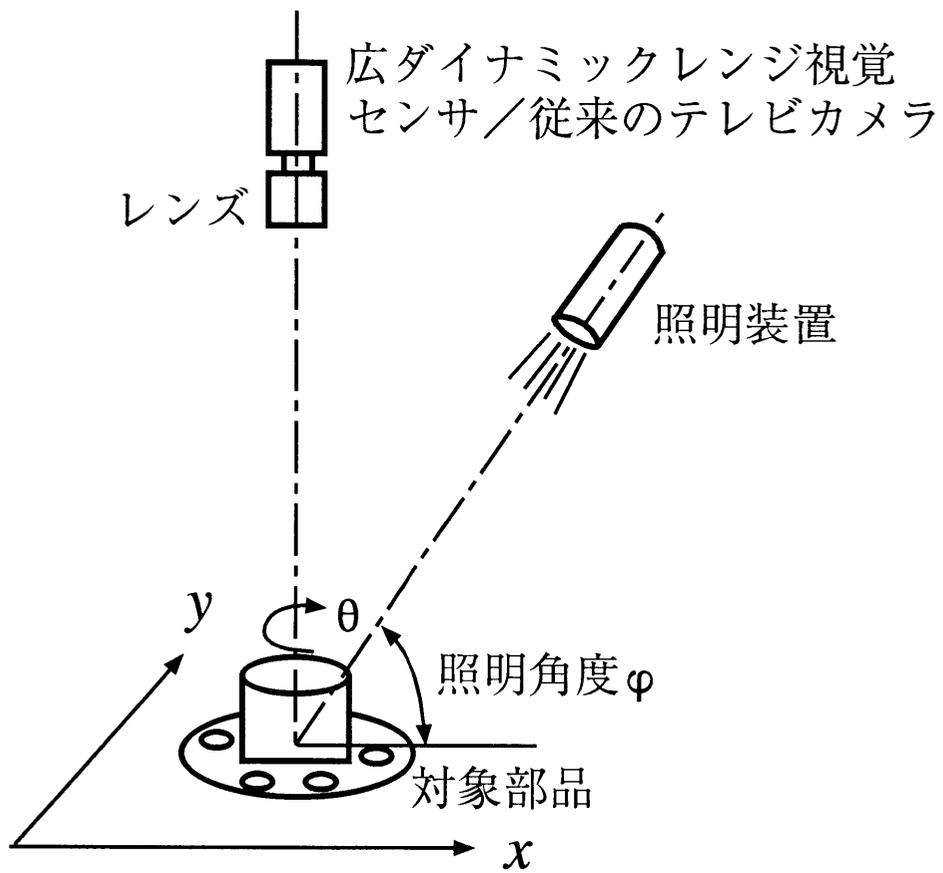


図 6.4 実験方法

この対数スケールで表した画像の 1 階調の変化に対応する、線形スケールの階調変化 Δf_{Lin} は、

$$\begin{aligned} (f_{\text{Log}} + 1) - f_{\text{Log}} &= 255 \frac{\log((f_{\text{Lin}} + \Delta f_{\text{Lin}})/17)}{\log(3840/17)} \\ &- 255 \frac{\log(f_{\text{Lin}}/17)}{\log(3840/17)} \end{aligned} \quad (6.3)$$

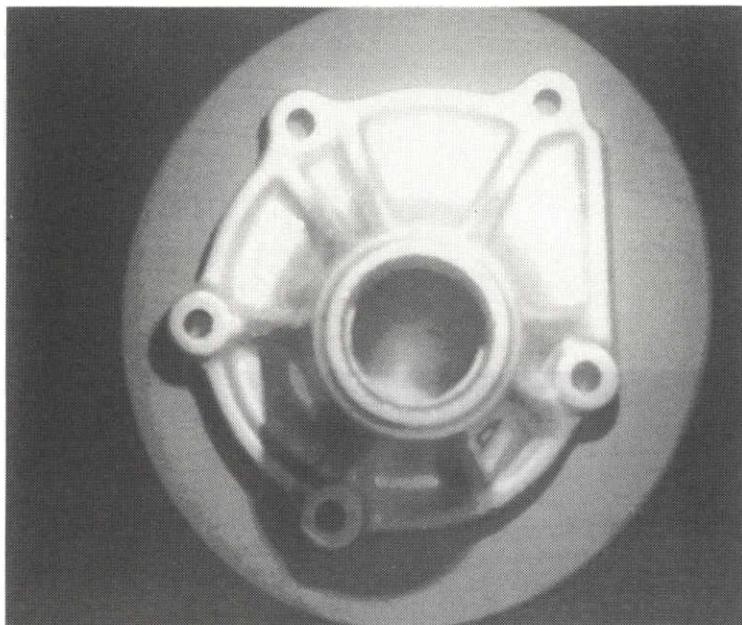
より、 $f_{\text{Lin}}/47$ となる。従って、この画像表現の線形スケールに換算した S/N は 47 であり、局所的なコントラストとして現れる丸穴のエッジの認識には十分な S/N であると考えられる。

実験装置による照明を行わない状態での実験室内の明るさは 270 lx で、レンズの絞りを、この明るさで部品の丸穴のすべてが認識できる最も絞った状態に設定した。照明環境としては、図 6.4 に示す照明角度 φ を 15 度、30 度、45 度、60 度、75 度および 85 度の 6 通りに変化させ、さらにそれぞれの角度で照明強度を照度 500 lx から 50,000 lx まで変化させた。実験装置では 85 度以上の角度では部品が照明装置の陰に隠れてしまうため、最大角度は 85 度としている。また、照明装置の能力の限界により、照明角度 φ が 85 度の場合に限り最大照度は 30,000 lx である。対象部品には大きい丸穴が 1 個と小さい丸穴が 5 個あいているが、今回は 5 個の小さい丸穴を認識することにより部品位置を認識するようにした。丸穴の認識アルゴリズムにおける相関値 C_{fg} のしきい値には、特記する場合を除き、0.65 を用いた。実験は、各照明条件 (照明角度と照度の 65 通りの組合せ) について 3 回ずつ行った。

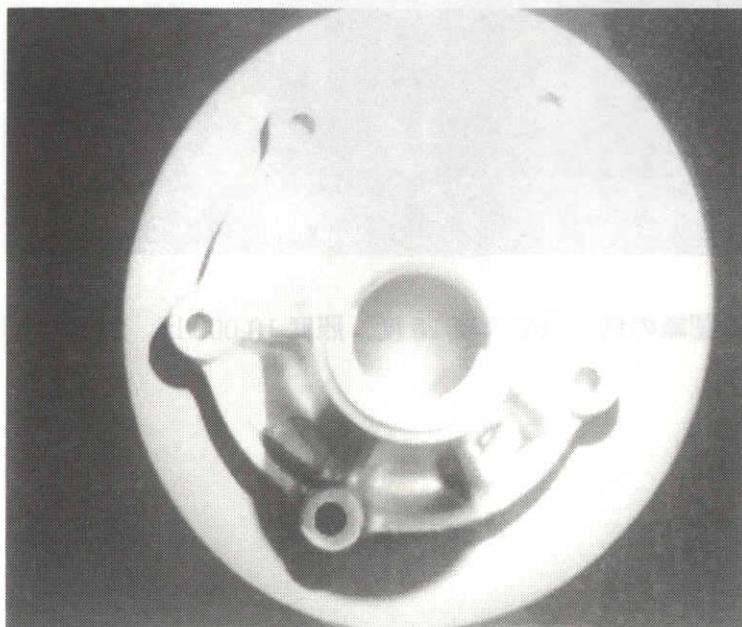
6.3.2 実験結果

部品の撮像画像の一例として、照明角度 φ が 75 度で照度 I が 10,000 lx の場合の画像を図 6.5 に示す。同図の画像において、円形に明るくなっている部分は照明装置による光があたっている領域である。同図 (a) の広ダイナミックレンジ視覚センサで撮像した画像からは 5 個の丸穴のすべてが認識できたのに対し、同図 (b) の従来のテレビカメラで撮像した画像からは、画像のハレーションのために、右上の丸穴が認識できなかった。なお、認識処理に要した計算時間は、ワークステーション Sun SPARCstation 10 で 1.6 秒であった。

図 6.6 には、丸穴ではない部分を丸穴と誤認識した画像の例を示す。同図の画像において、十字印は、視覚システムが認識した丸穴位置を示す。図中の右横の丸穴の付近に誤認識の個所がある。誤認識が発生した原因は、この例のように、部品の凸部の陰でできた暗い領域が丸穴と誤って認識されたためである。



(a) 広ダイナミックレンジ視覚センサ



(b) 従来のテレビカメラ

図 6.5 撮像画像の例 (照明角度 75 度, 照度 10,000 lx)

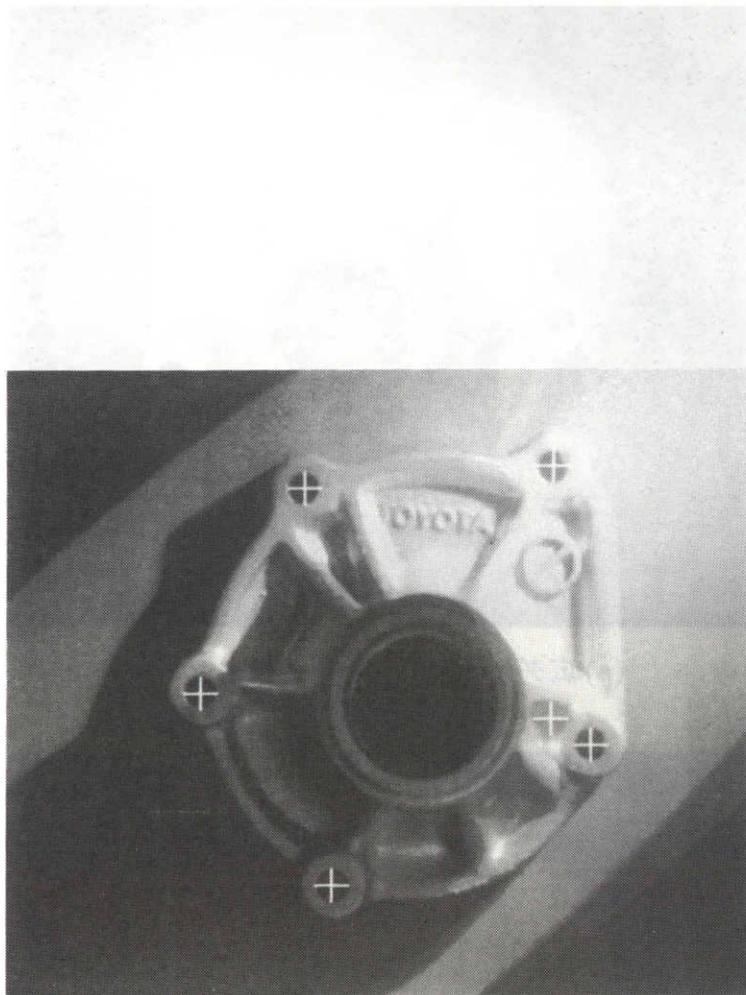


図 6.6 丸穴の誤認識の例 (照明角度 15 度, 照度 10,000 lx, 広ダイナミックレンジ視覚センサの場合)

図 6.7 に、照明環境と丸穴の認識結果の関係を示す。同図において、横軸は部品位置における照明光と垂直な面での照度 I を、縦軸は丸穴の認識率および誤認識率（丸穴ではない部分を丸穴と誤認識した数を全丸穴数で割った値）を示す。同図 (a) から、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた視覚システムの場合には、照明角度が 15 度から 85 度まで変動した場合にも、270 lx から 10,000 lx の約 37 倍の照度変化範囲ですべての丸穴が認識できることが分かる。一方、同図 (b) からは、従来のテレビカメラを用いた場合には、270 lx から 1,500 lx の約 5.5 倍の照度変化範囲でしかこれらの丸穴が認識できないことが分かる。両者の場合とも、すべての丸穴が認識できる最大照度が、照明角度 φ が大きくなるにしたがって小さくなるのは、 φ が大きいほど、部品表面での正反射の影響が強くなるためと考えられる。

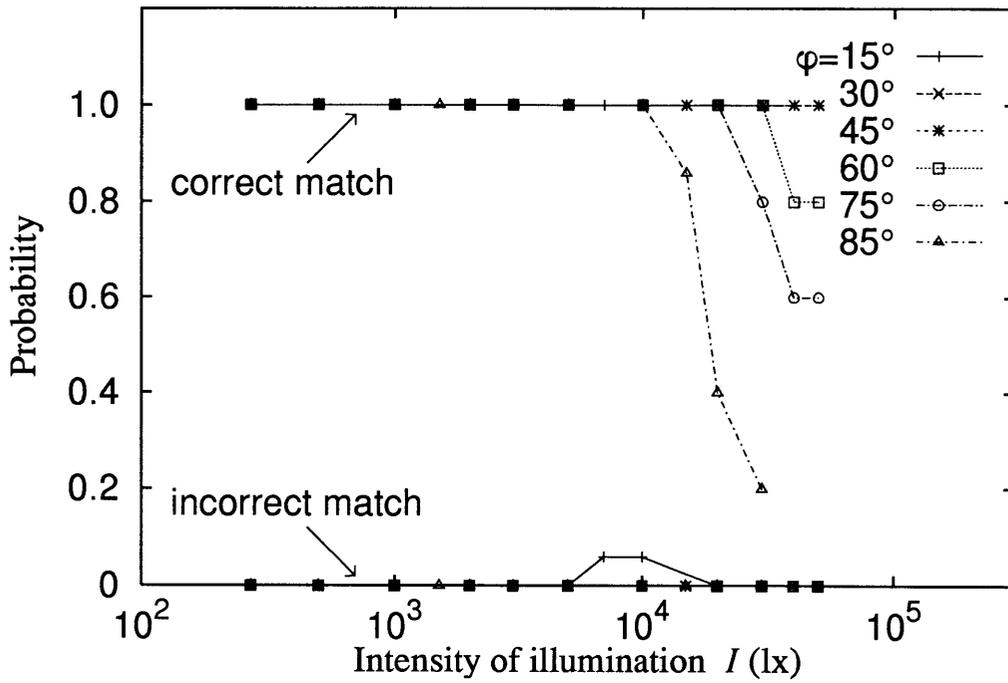
本位置決め視覚システムでは、図 6.2(b) に示したように、撮像画像から認識した各丸穴の位置から、部品の丸穴位置の相互関係についての知識を使って、最終的に部品の位置を認識する。図 6.8 には、この結果、部品の位置が正しく認識できた割合を示す。同図に示したように、撮像に従来のテレビカメラを用いた場合には、最大でも約 7.4 倍の照度変化範囲でしか部品の位置が認識できていない。これに対し、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた本方式では、約 55 倍の照度変化範囲で部品の位置を認識できている。なお、認識された部品位置と実際の位置との差の標準偏差は、いずれの場合も、0.2 画素であった。

6.3.3 照明環境の変動に対するロバスト性

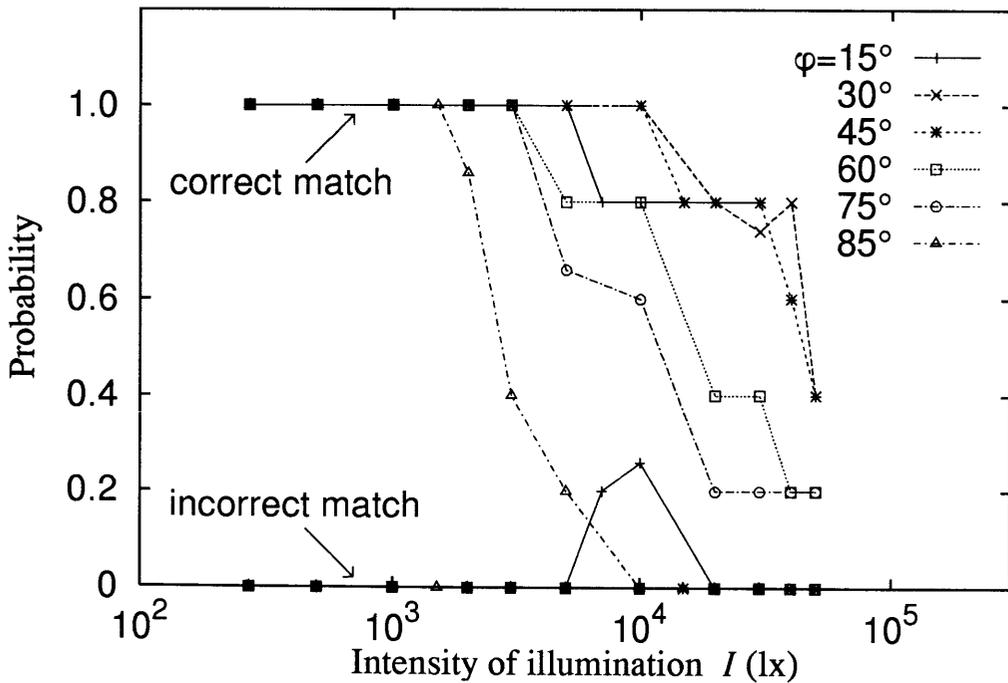
上記の実験結果をもとに、工場環境を想定し、照度が 500 lx から 10,000 lx まで変動した場合の位置決め視覚システムの認識性能を求める。

レンズ絞りを 500 lx ですべての丸穴が認識できる限界まで絞った状態に設定したとすると、上記の実験結果から換算して、本視覚システムでは 500 lx から約 27,000 lx まで対応できることになる。一方、従来のテレビカメラを用いた場合には、約 3,700 lx までしか対応できない。実際には、余裕を考慮して、レンズ絞りを限界まで絞って設定することはしないが、本視覚システムは、そのような場合でも、照度の変動範囲に対して十分に余裕があると言える。

本実験でのレンズ絞りの条件において照度が 500 lx から 10,000 lx の範囲で変動した場合の視覚システムの性能と特性を求めるために、実験で得られた画像のうちで照度が 500 lx 以上、10,000 lx 以下の 105 枚の画像の総計 525 個の丸穴について、相関値のしきい値を 0.4 から 0.8 まで 0.05 間隔で変化させて、丸穴の認識率（認識できた丸穴の数を丸穴の総数で割った値）および誤認識率（丸穴と誤認識した数を丸穴の総

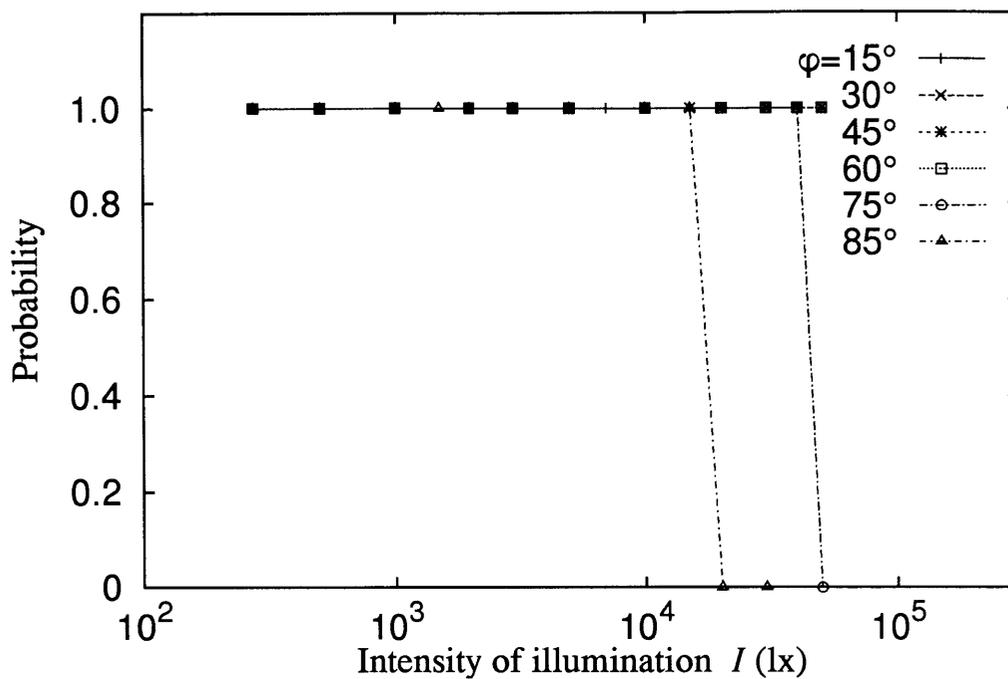


(a) 広ダイナミックレンジ視覚センサ

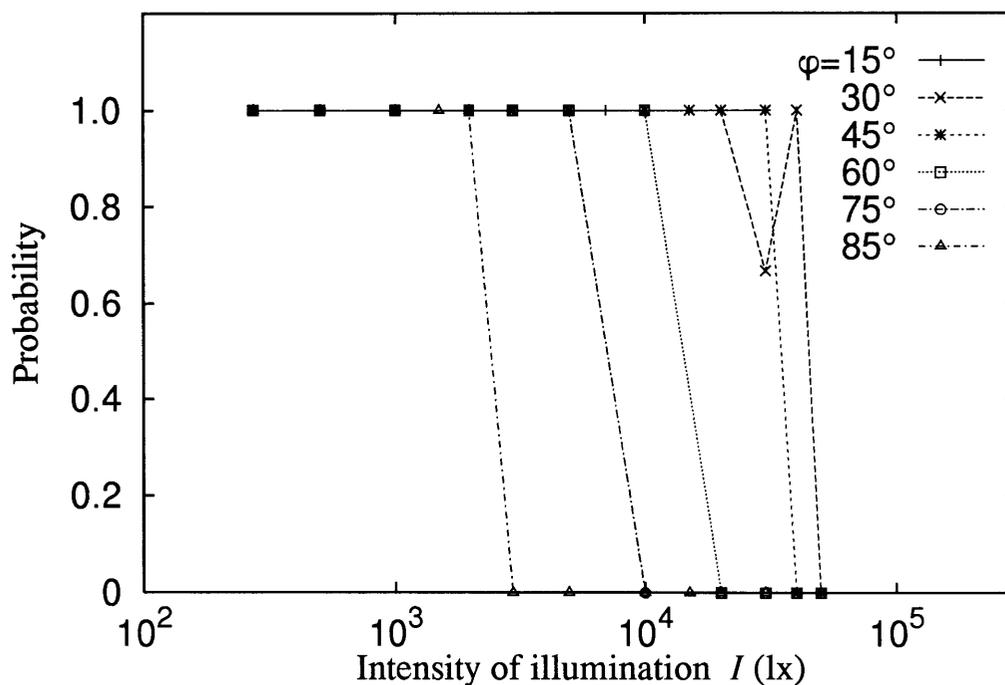


(b) 従来のテレビカメラ

図 6.7 実験結果：照明環境（照度 I ，照明角度 φ ）と丸穴の認識率および誤認識率との関係



(a) 広ダイナミックレンジ視覚センサ



(b) 従来のテレビカメラ

図 6.8 実験結果：照明環境 (照度 I , 照明角度 φ) と部品位置の認識率との関係

数で割った値) を求めた。この結果を表 6.1 に示す。同表から分かるように、しきい値が 0.70 以下の範囲において、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた場合の認識率は 100% であるのに対し、通常のテレビカメラを用いた場合には 85% から 97% である。誤認識率には両者で大きな違いは見られない。

本位置決め視覚システムでは、撮像画像から認識した各丸穴の位置から、部品の丸穴位置の相互関係についての知識を使って、最終的に部品の位置を認識する。表 6.2 には、照度が 500 lx 以上、10,000 lx 以下の前述の 105 枚の画像について、部品の位置が認識できた割合を示す。同表に示したように、撮像に通常のテレビカメラを用いた場合には、最大でも 91% の場合でしか部品の位置が認識できなかった。これに対し、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた本方式では、しきい値が 0.50 から 0.80 の広い範囲にわたって、実験を行ったすべての照明環境について部品の位置を安定に認識することができた。なお、認識された部品位置と正しい位置の差の標準偏差は、いずれの場合も、0.2 画素であった。

以上の結果から、本視覚システムが工場で生じる照明環境の変動の影響を受けることなく部品を位置決めできることが示され、本方式の有効性が確認された。

6.4 結言

照明環境の変動に強い部品位置決め視覚システムについて述べた。このシステムは、明るさが変化しても画像情報が欠落しないよう、対象部品の撮像に広ダイナミックレンジ視覚センサを用いたものである。試作した位置決め視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性を、撮像に従来のテレビカメラを用いた場合との比較により評価した。その結果、工場を想定して照度を 500 lx から 10,000 lx まで変化させたときの部品位置の認識率は、各 105 枚のサンプル画像について、従来のテレビカメラを用いた場合には約 90% であったのに対し、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた本方式では 100% の認識率が得られた。これらの評価実験により、本位置決め視覚システムの有効性を確認し、テレビカメラのダイナミックレンジ拡大が視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性の向上に極めて有効であることを明らかにした。

表 6.1 部品丸穴の認識性能（照度変化範囲：500 lx ～ 10,000 lx，照明角度変化範囲：15度～85度，サンプル画像の数：105）

相関値の しきい値	広ダイナミック レンジ視覚センサ		通常のテレビカメラ	
	認識率 (%)	誤認識率 (%)	認識率 (%)	誤認識率 (%)
0.40	100	536	97	392
0.45	100	193	97	140
0.50	100	57	96	54
0.55	100	11	94	13
0.60	100	3.0	91	3.4
0.65	100	0.4	88	1.3
0.70	100	0	85	0.8
0.75	99	0	80	0
0.80	96	0	72	0

表 6.2 部品位置の認識率（照度変化範囲：500 lx ～ 10,000 lx，照明角度変化範囲：15 度～ 85 度，サンプル画像の数：105）

相関値の しきい値	広ダイナミック レンジ視覚センサ	通常のテレビカメラ
0.40	97 (%)	90 (%)
0.45	97	91
0.50	100	91
0.55	100	89
0.60	100	88
0.65	100	83
0.70	100	84
0.75	100	85
0.80	100	79

第 7 章

輝度比符号化光源による鏡面の角度計測

7.1 緒言

第 4 章では、照明環境の変動があっても情報が欠落することなく画像をセンシングできることを目的に、明るさのダイナミックレンジが広い画像センシング法を開発した。そして、このセンシング法を、第 5 章では自動車の走行環境認識のための視覚に、第 6 章では FA のための部品位置決め用ロボットの視覚に応用し、その有効性を明らかにしてきた。本章では、この画像センシング法を、照明環境の変動に反射光が強い影響を受ける著しい正反射特性をもつ金属鏡面の計測へ適用する。

産業の分野では、著しい正反射特性を持つ金属鏡面物体が多数存在し、これらの寸法や形状の計測への期待は非常に大きい。このような鏡面物体の 1 つに、電子部品の接合に用いられるはんだがある。特に最近では、はんだに含まれる鉛の地球環境へ与える影響が問題視されるようになり、鉛を使わないはんだ材料の開発が急がれている。はんだ材料の開発では、はんだの濡れ性の評価が重要である [60]。濡れ性を定量的に測定するには、溶融状態におけるはんだと母材との接触角の測定が必要であり [61]、さらに、はんだのフィレット上の各位置における接触角の分布とその時間的な変化まで計測することが望まれている。そこで本章では、新しいはんだ材料の開発のために、溶融状態におけるはんだの接触角の計測技術を考える。

金属鏡面物体のような正反射特性の強い物体の形状や角度を、画像を用いて非接触で計測する手法は、拡散面の計測方法を正反射の影響を受けないように改良したものの [62]、偏光特性を利用する方法 [63]、ならびに正反射特性を利用する方法 [64] の 3 種類に分類される。拡散面の計測方法を改良したものは、溶融したはんだのような拡散反射成分がほとんど無い対象には適用できない。偏光を利用する方法は、正反射時の偏光変化が大きい誘電体を対象としており、金属面への適用は難しいと考えられる。

正反射特性を利用した方法は、基本的には、何らかの方法で光源を符号化することにより、画像上の各点が複数ある光源のうちどの光源からの正反射光に対応しているかを特定し、この光源の位置情報から鏡面の角度を求めるものである。この方法では、計測精度や計測速度は、いかに多くの光源を正確かつ迅速に対応付けることができるかによって決まる。

鏡面の正反射特性を利用する具体的な計測方法として、点光源を走査する方法 [64]、疑似照度差ステレオ法 [65] [66]、M 系列／配列符号化法 [67] [68]、周囲の物体の鏡面像を手がかりに形状を復元する方法 [69]、位置により色が異なるカラーストライプ光源を用いる方法 [70]、段差照明法 [71]、カラーハイライト法 [72]、ならびにレーザー光の反射方向から求める方法 [73] などが報告されている。

光源を走査する方法や段差照明法は、複数の光源を順次点灯することによって光源を時間的に符号化している。疑似照度差ステレオ法では、直線光源で照明した拡散板などを用いて光源を明るさで符号化している。また、M 配列符号化法では光源面の小領域の濃淡パターンで符号化し、カラーストライプ光源を用いる方法やカラーハイライト法では光源の色で符号化している。

これらのうち、光源を時間的に符号化する方法では、対応付けは確実にできるが、角度精度を向上させるために光源数を増やせば増やすほど、画像取り込みに要する時間が長くなる。明るさで符号化する方法では、面光源の反射像を一度に撮像するので画像取り込みに要する時間は短い。光源の明るさの安定性や画像の雑音の影響により対応付けの精度が落ちやすい。小領域の濃淡パターンで符号化する方法では、計測対象の鏡面が濃淡パターンが復号化できる程度に滑らかである必要がある。また、光源の色で符号化する方法では、光源数を増やすほど反射光の色の識別が困難になる。

本章では、溶融状態のはんだの接触角の計測などを目的とし、計測精度と速度を合わせ持った、鏡面の角度の計測方式を提案する。この計測方式は、鏡面の正反射特性を利用した方法の1つで、光源の符号化に輝度比を用いる。そして、正反射光の検出に第4章で示したダイナミックレンジの広い画像センシング技術を用いることで、より多くの光源を同時に対応付けられるようにし、鏡面の角度を精度良くかつ高速に計測するものである。以下、本計測方式の原理とその理論的性能を示した後、本方式をはんだ材料の濡れ性評価のための溶融はんだの接触角の計測に適用し、本計測方式が有効であることを示す。

7.2 計測方式

提案する計測方式は、鏡面の正反射特性を利用した角度計測法の1つで、光源を輝度比で符号化するものである。まず、本方式を説明するための前知識として、鏡面の正反射特性を利用した角度検出の原理を述べる。次に、光源を輝度比で符号化して鏡面の角度を計測する方式について述べる。

7.2.1 正反射光による鏡面の角度検出の原理

図7.1に、正反射特性を利用した鏡面の角度検出の原理を示す。光が鏡面で反射するときには、入射角 θ_i と反射角 θ_r が等しい。それゆえ、テレビカメラで撮像した鏡面物体の画像の各点が、複数ある光源のうちどの光源からの光に対応するかを特定することによって、鏡面の角度を求めることができる。3次元空間内の面の方向は一般に2つの角度を用いて表されるが、ここでは対象とする鏡面の法線方向が図7.1に示したように紙面と平行である場合について考える。そして、点Pでの面の法線ベクトル N と基準線B-B'とが成す角度を、その点における鏡面の角度と定義する。

鏡面の点Pにおける角度 θ_{obj} は、図7.1から分かるように、多重反射が無いとき、

$$\theta_{obj} = (\theta_{lig} + \theta_{cam})/2 \quad (7.1)$$

で求められる。ここで、 θ_{lig} および θ_{cam} はそれぞれ、点Pから見た光源およびテレビカメラの角度である（図7.1を参照）。光源の間隔から決まる角度分解能は、隣り合う光源の角度間隔を $\Delta\theta_{lig}$ とすると、 $\Delta\theta_{lig}/2$ である。光源と対象物との距離 $l_{lig-obj}$ を計測領域の中心から端までの距離 l_{reg} よりも十分長くとることにより、光源の方向 θ_{lig} は計測領域内では一定と近似することができる。この近似による計測角度の最大誤差は、 $\{\tan^{-1}(l_{reg}/l_{lig-obj})\}/2$ となる。また、カメラレンズの開口による計測角度の最大誤差は、開口の半径を a 、開口と対象物の距離を $l_{len-obj}$ とすると、 $\{\tan^{-1}(a/l_{len-obj})\}/2$ で表される。

7.2.2 輝度比符号化法

複数の光源を高速に対応付けるための方法として、光源を輝度比で符号化する方式を提案する。これを図7.1および図7.2を用いて示す。この方式では、2通りの輝度分布で発光させることができる光源群を用いる。この光源群によって対象物に2通りに光を投射し、それぞれの場合の対象物の画像を撮像する。この2つの撮像画像の比から正反射光の光源を特定し、その光源位置から鏡面の角度を求める。すなわち、それぞれの光源の輝度が第1のパターンになるようにすべての光源を同時に発光させた

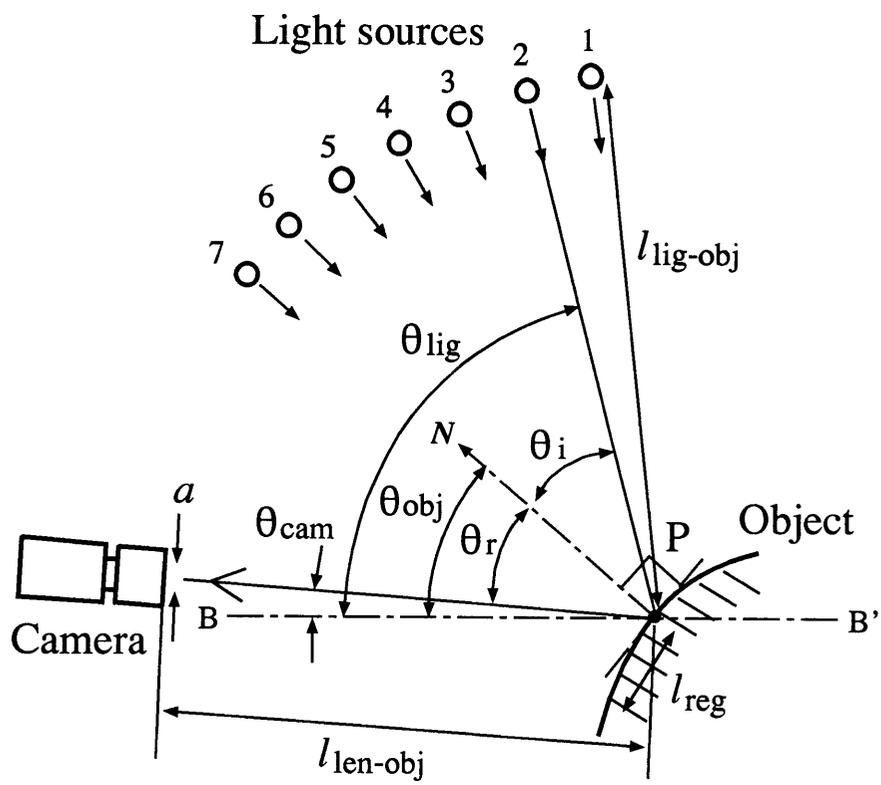


図 7.1 正反射特性を利用した鏡面の角度検出の原理

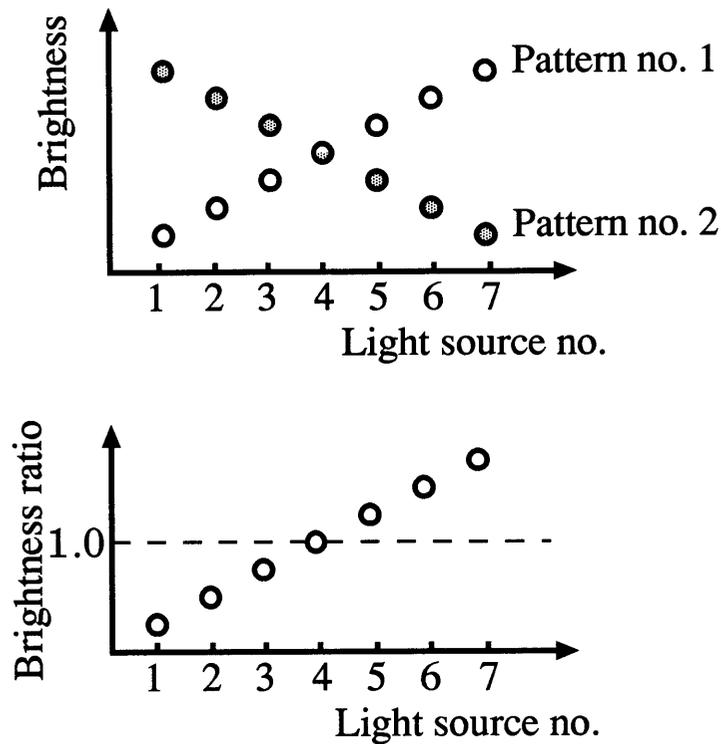


図 7.2 輝度比符号化法

ときと、それぞれの光源の輝度が第2のパターンになるようにすべての光源を同時に発光させたときとの、合計2枚の画像を撮像する。各光源の第1の輝度と第2の輝度は、両者の比がそれぞれの光源ごとにある特定の値になるように設定する。こうすることで、明るさの比から各画素に対応する光源を特定することができる。輝度比を用いているので、各々の光源の発光面上での位置による輝度の違いや計測する鏡面の位置による反射率の違いおよび光源の発光面の汚れによる輝度の変動などの影響を受けずに、光源を安定に特定できる。

計測角度の分解能は、同時に特定できる光源の数が多いほど高くなる。そして、計測が精度良く行えるためには、これらすべての光源が同時に確実に特定できなければならない。以下では、光源の輝度比および撮像に用いるテレビカメラの特性と特定可能な光源数との関係を明らかにする。また、このなかで、正反射光を検出するテレビカメラのダイナミックレンジを第4章で示した方式で拡大することによって、特定可能な光源数がどれだけ増加させられるかを検討する。

まず、同じテレビカメラでより多くの光源を特定できるようにするためには各光源をどのような輝度で発光させれば良いかを検討する。 i 番目の光源からの光が対象鏡

面でテレビカメラの方向に正反射するとき、この光源を第1の輝度 I_{Ai} および第2の輝度 I_{Bi} で発光させた場合に対象鏡面に焦点を合わせたテレビカメラで観測される鏡面の輝度 \tilde{I}_{Ai} および \tilde{I}_{Bi} は、それぞれ、

$$\tilde{I}_{Ai} = r_i I_{Ai} + N_{Ai}, \quad \tilde{I}_{Bi} = r_i I_{Bi} + N_{Bi} \quad (7.2)$$

と表される。ここで、 r_i は光源の輝度と対象鏡面の輝度との比例係数（以下、反射率とよぶ）である。輝度 I_{Ai} および I_{Bi} のどちらについても光は光源からテレビカメラまで同じ経路を通るので、反射率は両者に対して同じ値となる。また、 N_{Ai} および N_{Bi} はこのときのテレビカメラの雑音を表す。観測された輝度の比 $\tilde{I}_{Ai}/\tilde{I}_{Bi}$ から光源が特定できるためには、雑音の大きさ $|N_{Ai}|$ および $|N_{Bi}|$ は輝度 \tilde{I}_{Ai} および \tilde{I}_{Bi} よりも十分小さくなければならない。従って、輝度の比から光源が特定できるためのテレビカメラの雑音の条件は、テレビカメラの雑音と信号の比で定められることになる。そこで、テレビカメラの雑音特性を、定数 c を用いて、

$$|N_{Ai}|/\tilde{I}_{Ai} < c, \quad |N_{Bi}|/\tilde{I}_{Bi} < c \quad (\text{for all } i) \quad (7.3)$$

と表す。このとき、任意の2つの光源 i と j （但し、 $i \neq j$ ）が区別できるための条件は、式(7.2)、(7.3)より、

$$\left| \log \frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} - \log \frac{I_{Aj}}{I_{Bj}} \right| \geq 2 \log \frac{1+c}{1-c} \quad (7.4)$$

となる（式の導出は付録参照）。添え字 i を、 $I_{Ai}/I_{Bi} > I_{A_{i-1}}/I_{B_{i-1}}$ となる順に付けると、上式は、

$$\frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} = \frac{I_{A_{i-1}}}{I_{B_{i-1}}} \beta_i^2, \quad \beta_i \geq \frac{1+c}{1-c} \quad (7.5)$$

と書き換えられる。ここで、 β_i は光源の輝度比の増加割合の平方根である。この β_i の値が小さいほど、光源の輝度の分布範囲を狭くできるので、同じダイナミックレンジのテレビカメラでより多くの光源を特定できることになる。そこで以下では、 β_i が i によらず一定値 β 、但し、

$$\beta = \frac{1+c}{1-c} \quad (7.6)$$

の場合を考える。そのとき、光源の輝度の分布範囲が最小になるのは、各光源の輝度が、

$$\begin{aligned} I_{Ai} &= I_{A1} \beta^{i-1}, \\ I_{Bi} &= I_{Bm} \beta^{m-i}, \\ I_{A1} &= I_{Bm} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \end{aligned} \quad (7.7)$$

の場合である。ここで、 m は光源の総数である。

次に、輝度比で符号化された光源が特定できるためのテレビカメラの条件を検討し、異なる露光条件の撮像画像を合成してテレビカメラのダイナミックレンジを拡大することにより特定可能な光源数を増加できることを示す。光源の輝度の最大値と最小値の比は、式(7.7)より、 β^{m-1} であるので、テレビカメラに要求されるダイナミックレンジ D は、

$$D \geq \beta^{m-1} M \quad (7.8)$$

となる。ここで、 $M(\geq 1)$ は、許容できる鏡面の反射率 r_i のばらつきを表す値で、 r_i の最大値と最小値の比である。なお、光源の発光面上での位置による輝度の違いや輝度の経時的変動などの影響は反射率 r_i の変動と等価であるので、これらはすべて反射率 r_i のばらつきに置き換えて考えることにする。

式(7.8)で示されるように、光源数 m を増やすほど、これらの光源の特定にはダイナミックレンジが広いテレビカメラが必要となる。

テレビカメラのダイナミックレンジは、第4章で示したように、複数の異なる露光条件で撮像してこれらの画像を組合せる方法によって拡大することができる。ここでは、露光条件を変化させる手段として、テレビカメラのシャッタースピードの制御による露光時間の変化を考える。露光時間を α 倍ずつ n 種類 ($n \geq 1$) 変化させて撮像した n 枚の画像からダイナミックレンジを拡大した画像を得る場合、得られた画像で雑音特性が

$$|N|/\tilde{I} < \frac{\alpha}{(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}} \quad (7.9)$$

であるダイナミックレンジ D_n は、式(4.5)より、

$$D_n = \alpha^n \quad (7.10)$$

である。ここで、 $L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}}$ および γ は、テレビカメラの SN 比とガンマパラメータである。

式(7.10)は、 $n = 1$ の場合はダイナミックレンジの拡大を行わない場合に相当するので、以下ではダイナミックレンジを拡大する場合としない場合との両方を含めて同式により表される画像を議論の対象とする。

光源が特定できるための画像の雑音特性の条件は、式(7.3)(7.6)より、

$$|N|/\tilde{I} < \frac{\beta - 1}{\beta + 1} \quad (7.11)$$

である。従って、ダイナミックレンジが拡大された前述の画像から光源が特定できるためには、式(7.9)(7.11)より、

$$\frac{\beta - 1}{\beta + 1} = \frac{\alpha}{(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma}} \quad (7.12)$$

であればよい。よって、式(7.8)の右辺で示された輝度範囲 $\beta^{m-1}M$ が画像のダイナミックレンジ D_n に収まる条件は、式(7.8)(7.10)(7.12)より、

$$\{(L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}})^{1/\gamma} \left(\frac{\beta - 1}{\beta + 1}\right)\}^n \geq \beta^{m-1}M \quad (7.13)$$

となる。よって、光源輝度比の増加割合の平方根 β 、テレビカメラの SN 比 $L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}}$ 、画像の露光条件の数 n および許容可能な反射率のばらつき M と、特定可能な光源の数 m との関係は、

$$m = \frac{\log\left\{\frac{1}{M} \left(\frac{L_{\text{sat}}}{L_{\text{noi}}}\right)^{n/\gamma} \left(\frac{\beta - 1}{\beta + 1}\right)^n\right\}}{\log \beta} + 1 \quad (7.14)$$

である。図 7.3 に、上式で示される β と m の関係をグラフで示す。同図から、特定可能な光源の数 m は光源輝度比の増加割合の平方根 β に依存し、この光源の数 m を最大にする β の値が存在することが分かる。

以上で示されたように、光源を式(7.7)で示した輝度になるように 2 種類の発光パターンで発光させて輝度比で符号化し、そのときの鏡面物体を n 種類の露光条件で撮像することにより、式(7.14)で示した個数 m の光源が同時に特定でき、高速な鏡面の角度計測が可能になる。

7.3 はんだ接触角計測への適用

7.3.1 計測対象

図 7.4 に示すように、はんだ浴に銅板などの母材を浸漬したとき、溶融したはんだと母材との表面張力の作用により、両者の接触部付近ではんだが曲面形状になる。はんだ溶融状態でのこの曲面部分の角度は、はんだの濡れ性を定量的に表すとされ、はんだ材料の研究開発において、重要な評価値と考えられている。

計測対象は、図 7.4 に示したように、はんだ浴に試験片(母材)を垂直に浸漬したときに形成されるはんだと試験片との成す角度で、その時間的変化を計測する。試験片は板状なので、計測対象の鏡面の法線方向は試験片の中心軸付近では $y-z$ 面と平行になる。そこで、 $y-z$ 面に平行な面内での角度 θ_{obj} を計測する。目標とする角度計測範囲は $\theta_{\text{obj}} = 7 \sim 44$ 度、計測精度は 3 度である。

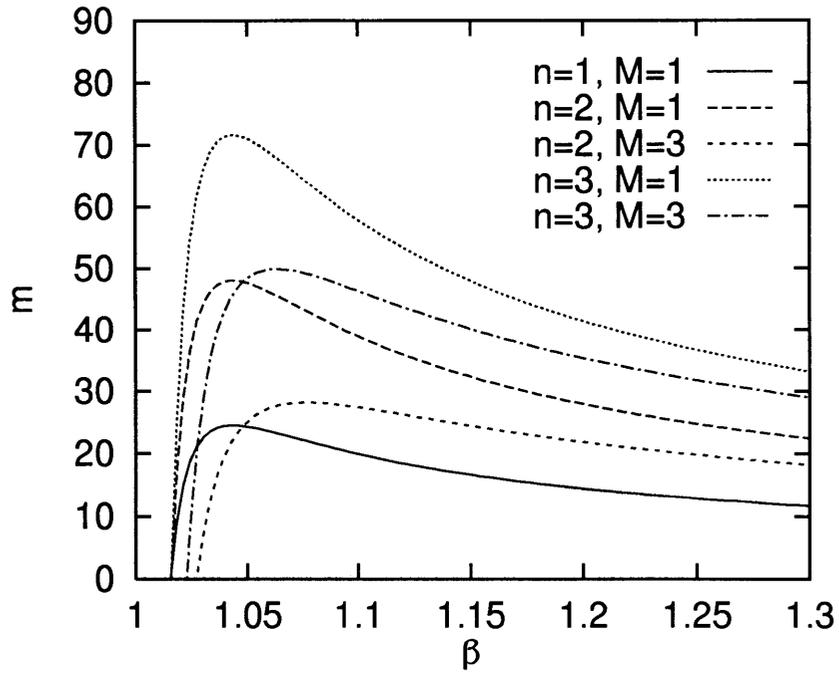


図 7.3 輝度比の増加割合の平方根 β と特定可能な光源数 m の関係 ($L_{\text{sat}}/L_{\text{noi}}=128$, $\gamma = 1.0$)

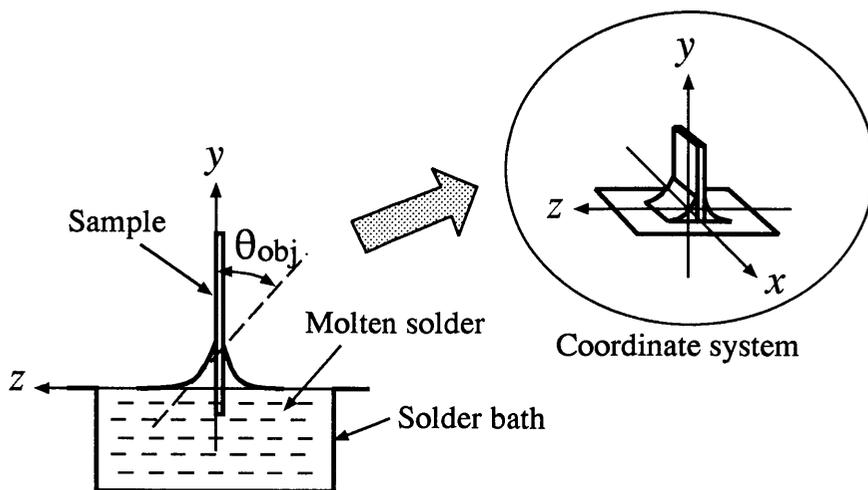


図 7.4 計測対象のはんだ曲面

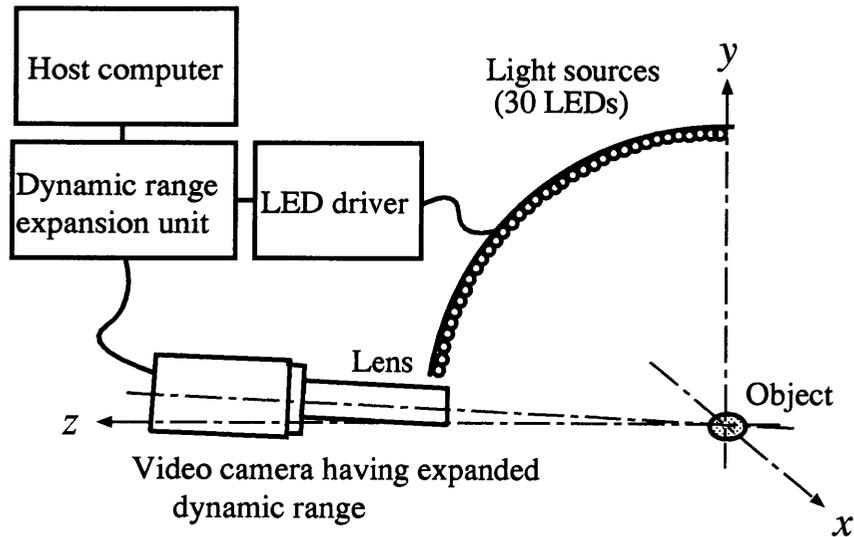


図 7.5 計測システムの構成

7.3.2 計測システムの構成

(a) 全体構成

図 7.5 に、前述した計測方式を用いた溶融はんだの接触角計測システムの全体構成を示す。このシステムは、光源となる LED、LED を制御する LED 制御回路、対象鏡面を撮像するためのテレビカメラおよびこれらを制御する計算機とから構成されている。なお、通常のテレビカメラではダイナミックレンジが不足するので、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大するために、第 5 章で屋外走行環境認識のために開発したダイナミックレンジ拡大処理ハードウェアを用いた。

光源の LED（ピーク発光波長：880nm）は、対象物を中心とした円弧上に等間隔に配置してある。対象物のはんだの温度は、たかだか摂氏 300 度であるので、対象物からの近赤外光の放射は、LED のから光に比べ無視できるレベルである [75]。本計測システムの諸定数は表 7.1 に示した値であり、理論上の角度計測精度は 2.8 度となる。そして、7～44 度の角度範囲を精度 2.8 度で計測するために必要な光源数 m は 30 である。計測システムに用いるテレビカメラの SN 比は、テレビカメラからの画像を 256 階調にデジタル化して処理しているため、画像の雑音の大きさ L_{noi} を 2 と見積もると、 $L_{sat}/L_{noi} = 128$ となる。画像の露光条件の数 n が 1 の場合、すなわち、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大しない場合には、テレビカメラのガンマパラメータ γ を 1 とすると、特定可能な光源数 m は最大でも 24 となり不足する。これに

対し、露光条件の数 n を 2 とすると、30 の光源を特定することが可能になり、さらに鏡面の反射率 r_i のばらつき M を 2.6 まで許容することができるようになる。

表 7.1 計測システムの諸定数

LED の角度間隔 $\Delta\theta_{\text{lig}}$	2.6 度
光源と対象物の距離 $l_{\text{lig-obj}}$	84 mm
カメラの角度 θ_{cam}	0 度
レンズ開口と対象物の距離 $l_{\text{len-obj}}$	75 mm
計測領域の中心から端までの最大長さ l_{reg}	1.0 mm
レンズ開口の半径 a	3.0 mm

(b) 輝度比符号化光源

図 7.6 は、輝度比符号化光源を実現するための LED 光源の駆動回路を示したものである。LED の発光強度は電流で制御している。同図で、各 LED の電流は、それぞれの LED に直列に接続された抵抗 R_{Ai} および R_{Bi} によって決められる。この回路において、LED の順電圧 V_F のばらつきに比べて十分大きい電圧 V を回路の端子間 T_A - G または T_B - G に印加したとき、 i 番目の LED を流れる電流は $(V - V_F)/R_{Ai}$ または $(V - V_F)/R_{Bi}$ になる。一般に、LED の発光強度は駆動電流に対して直線性を持つので、LED の輝度比 I_{Ai}/I_{Bi} は抵抗の比 R_{Ai}/R_{Bi} に等しくなる。各 LED の輝度が式 (7.7) で示した関係を満たすようにするために、それぞれの抵抗値を $R_{Ai} = R_{A1}\beta^{i-1}$ 、 $R_{Bi} = R_{Bm}\beta^{m-i}$ にする。以上の構成の駆動回路を用いることにより、端子間 T_A - G に電圧 V を印加したとき光源は第 1 の発光パターンとなり、端子間 T_B - G に電圧 V を印加したとき第 2 の発光パターンとなる。

LED の電流を決める抵抗には、実際には E-24 系列の抵抗を用いている。E-24 系列では、10 倍をほぼ等比的に 24 分割しているため、その等比係数は約 $10^{1/24} = 1.10$ 倍となっている。表 7.2 に、それぞれの LED の抵抗値 R_{Ai} 、 R_{Bi} と輝度比 I_{Ai}/I_{Bi} および輝度比の増加割合の平方根 β_i の計算値を示す。同表に示すように、抵抗値は完全な等比的関係にはなっていないので、前節で述べたように β が i によらず一定値とはならない。このように β が一定値ではない場合には、式 (7.8) は

$$D \geq (\beta_{\text{mean}})^{m-1} M \quad (7.15)$$

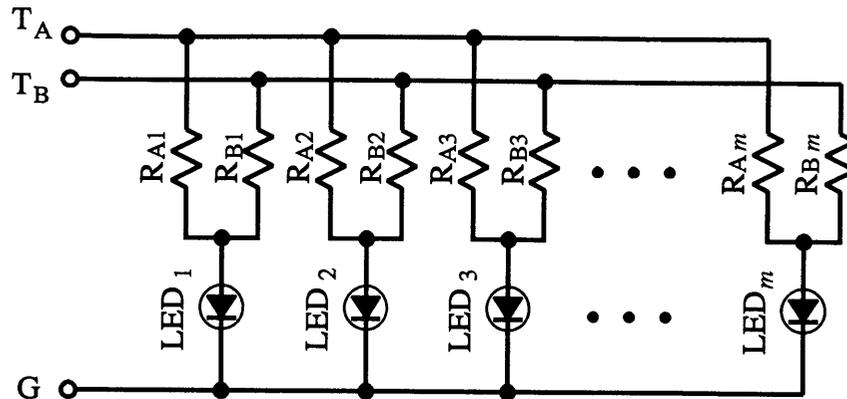


図 7.6 LED の駆動回路

と修正され、さらに、式 (7.14) で表されていた特定可能な光源の数 m は、

$$m = \frac{\log\left\{\frac{1}{M}\left(\frac{L_{\text{sat}}}{L_{\text{noi}}}\right)^{n/\gamma}\left(\frac{\beta_{\text{min}}-1}{\beta_{\text{min}}+1}\right)^n\right\}}{\log \beta_{\text{mean}}} + 1 \quad (7.16)$$

となる。但し、 β_{mean} および β_{min} は、それぞれ β の相乗平均と最小値を表す。表 7.2 から、 $\beta_{\text{min}} = 1.09$, $\beta_{\text{mean}} = 1.10$ であるので、光源数 m を 30 とした場合、許容可能な反射率のばらつき M は 1.9 になる。

(c) 動作

図 7.7 に、計測システムの動作タイミングチャートを示す。まず時間区間 ϕ_0 および ϕ_1 で、各 LED を第 1 パターンの輝度で同時に発光させたときの画像を 2 種類の露光時間 T_1 および T_2 で順次撮像する。この 2 種類の露光時間は、式 (7.9), (7.11) より露光時間の比率 α が 5.5 になるよう、それぞれ 1/440 秒と 1/80 秒にした。次に時間区間 ϕ_2 および ϕ_3 で、各光源を第 2 パターンの輝度で同時に発光させたときの画像を、2 種類の露光時間 T_2 と T_1 で順に撮像する。撮像された画像は、それぞれ 1 時間区間遅れて CCD から読み出される。画像から輝度比を求めて光源を特定する処理は、ダイナミックレンジ拡大処理ハードウェア内の画像のフィードバックループを利用してルックアップテーブルで行うようにした。画像メモリの各画素値が表す内容が、 ϕ_1 から ϕ_4 において、それぞれ図 7.8 のようになるよう、処理ハードウェア内のルックアップテーブルを設定しておく。同図において、 L_{ϕ_j} (但し、 $j=0,1,2,3$) は $L_{\phi_j}(x,y)$ を略記したもので、それぞれ ϕ_0 から ϕ_3 において撮像された画像の画素 (x,y) の明度値を示す。画像メモリの 1 画素に 8 ビットを使い、この内の 1 ビットをフラグとして、残りの 7

表 7.2 LED の電流を決める抵抗 R_A, R_B とそのときの LED の輝度比 I_A/I_B および輝度比の増加割合の平方根 β

i	$R_{Ai}(\text{k}\Omega)$	$R_{Bi}(\text{k}\Omega)$	I_{Ai}/I_{Bi}	β_i
1	0.43	6.8	0.0632	–
2	0.47	6.2	0.0758	1.09
3	0.51	5.6	0.0911	1.10
4	0.56	5.1	0.110	1.10
5	0.62	4.7	0.132	1.10
6	0.68	4.3	0.158	1.09
7	0.75	3.9	0.192	1.10
8	0.82	3.6	0.228	1.09
9	0.91	3.3	0.276	1.10
10	1.0	3.0	0.333	1.10
11	1.1	2.7	0.407	1.11
12	1.2	2.4	0.500	1.11
13	1.3	2.2	0.591	1.09
14	1.5	2.0	0.750	1.13
15	1.6	1.8	0.889	1.09
16	1.8	1.6	1.13	1.13
17	2.0	1.5	1.33	1.09
18	2.2	1.3	1.69	1.13
19	2.4	1.2	2.00	1.09
20	2.7	1.1	2.45	1.11
21	3.0	1.0	3.00	1.11
22	3.3	0.91	3.63	1.10
23	3.6	0.82	4.39	1.10
24	3.9	0.75	5.20	1.09
25	4.3	0.68	6.32	1.10
26	4.7	0.62	7.58	1.09
27	5.1	0.56	9.11	1.10
28	5.6	0.51	11.0	1.10
29	6.2	0.47	13.2	1.10
30	6.8	0.43	15.8	1.09

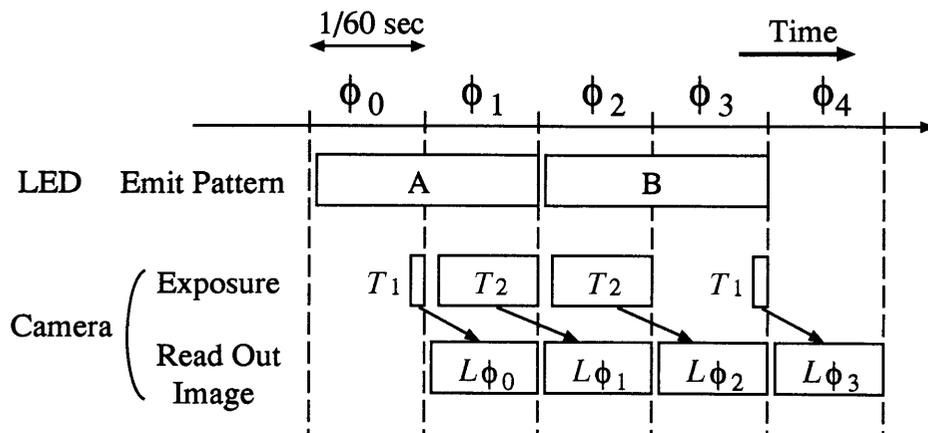


図 7.7 計測システムの動作タイミングチャート

ビットに値をコード化して保持する。このとき、同図から分かるように、 ϕ_4 が終った時点で、処理ハードウェア内の画像メモリの画素値は輝度比を表すことになる。画像メモリに得られた輝度比を表す画像は、次に繰り返す計測で上書きされないよう、計算機のメモリに転送する。この輝度比から、画像の各画素に対応する光源の番号 i を求める。上記動作を繰り返すことにより、はんだ角度の時間変化が計測される。

7.3.3 計測システムの性能評価

(a) 実験方法

製作した計測システムを用いて、計測方式の評価を行った。具体的には、まず、鏡面での反射率の影響を受けずに計測できることを確かめ、次に、2種類の露光条件で撮像してテレビカメラのダイナミックレンジを拡大した効果を評価した。また、これらの実験の結果から、計測システムの性能を求めた。

反射率の影響を受けないことを確かめるためには、図 7.9 に示した計測対象物を用いた。これは、表面が鏡面で直径が $5.000 \pm 0.005\text{mm}$ の鉄製の円柱状物体で、同図に示したように部分的に金がメッキしてある。実測の結果、金メッキの部分における波長 880nm の光の反射率は鉄の部分(研磨面)の約 1.7 倍であった。露光条件の数 n を 2 としてこの対象物を計測し、鉄の部分と金メッキの部分との計測結果を比較した。

次に、2種類の露光条件で撮像することによる効果を確かめるために、前述の対象物を露光条件の数 n を 1 として計測し、露光条件の数 n が 2 の場合の計測結果と比較した。

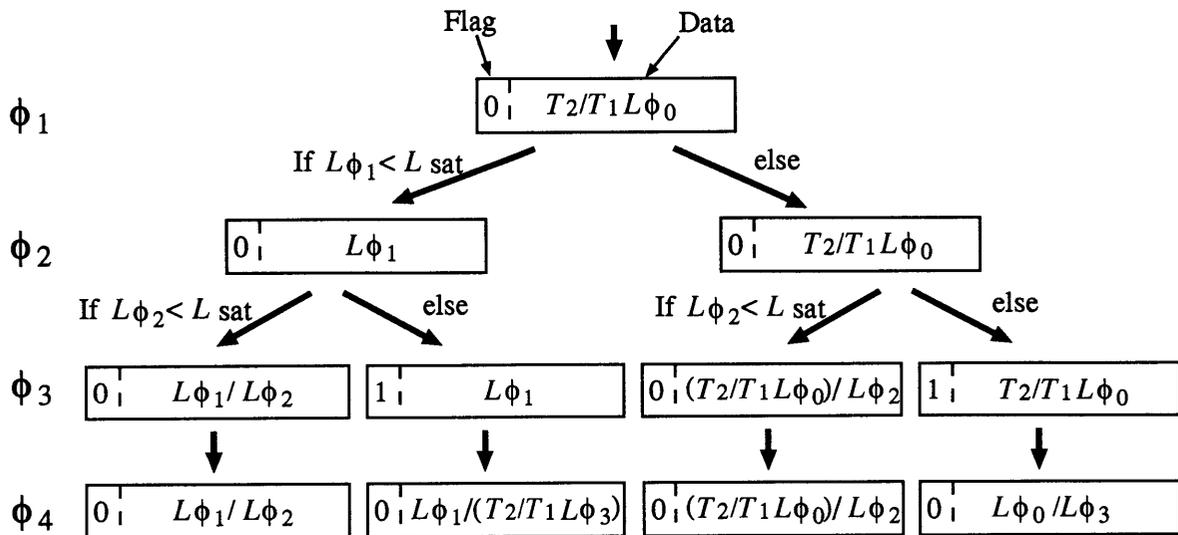


図 7.8 ダイナミックレンジ拡大処理ハードウェアの画像メモリの画素値が表す内容

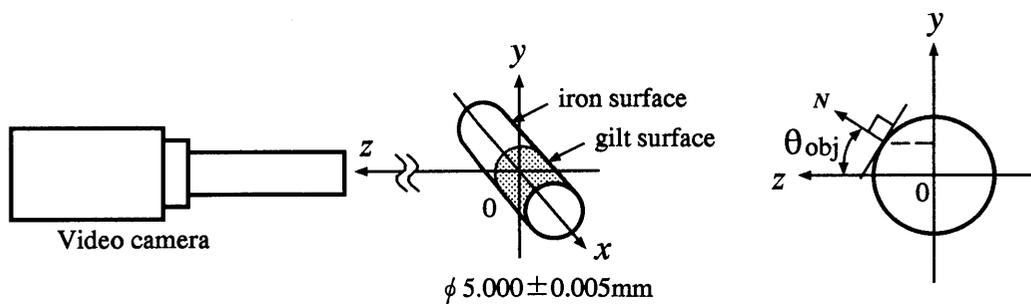


図 7.9 性能評価のための計測対象物

(b) 実験結果

図 7.10(a) に、露光条件の数 n が 2 の場合の計測結果を示す。同図の x 軸は、計測した円柱の回転対称軸に平行である。そして、 $x < 0$ が鉄の部分、 $x > 0$ が金メッキの部分に当たる。図 7.10(b) には、計測で得られた角度と既知形状から計算した角度との差 θ_{err} の分布を示す。

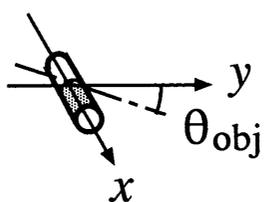
この計測の結果から、鉄の部分と金メッキの部分とも、角度の計測値と計算値との差の標準偏差 σ は 0.9 度、差の最大値は 3.3 度、計測可能な角度範囲は 7 ~ 44 度で、反射率の違いによる影響は認められなかった。実験による差の最大値 3.3 度は、理論上の最大誤差 2.8 度よりやや大きい。また、図 7.10(b) から分かるように、角度の差 θ_{err} の分布の偏り方は、 y の値に依存して異なっている。これらの原因としては、対象物自体の面の精度およびテレビカメラの明るさに対するリニアリティのずれの影響が考えられる。

図 7.11 に、露光条件の数 n を 1 とした場合の計測結果を示す。同図を図 7.10(a) に示した n が 2 の場合の計測結果と比較すると、 n が 2 の場合には 7 ~ 44 度の角度範囲が良好に計測できていたのに対し、 n が 1 の場合にはおよそ 20 ~ 30 度の範囲外では計測値が得られていない部分が多く、計測できる角度範囲が狭くなっていることが分かる。

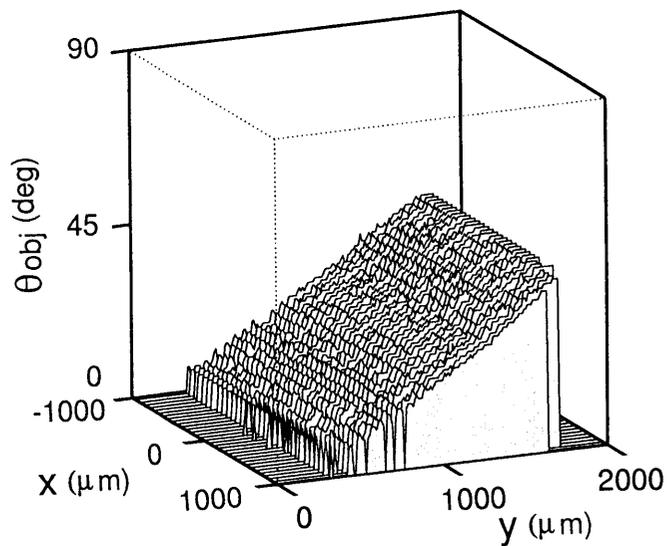
以上の結果から、本計測システムにおいて、反射率の影響を受けることなくほぼ理論通りの性能で角度が計測でき、さらに露光条件の数を 2 とすることで目標の角度計測範囲が実現できることが確認された。これらの実験から得られた計測システムの性能をまとめて表 7.3 に示す。

表 7.3 計測システムの性能

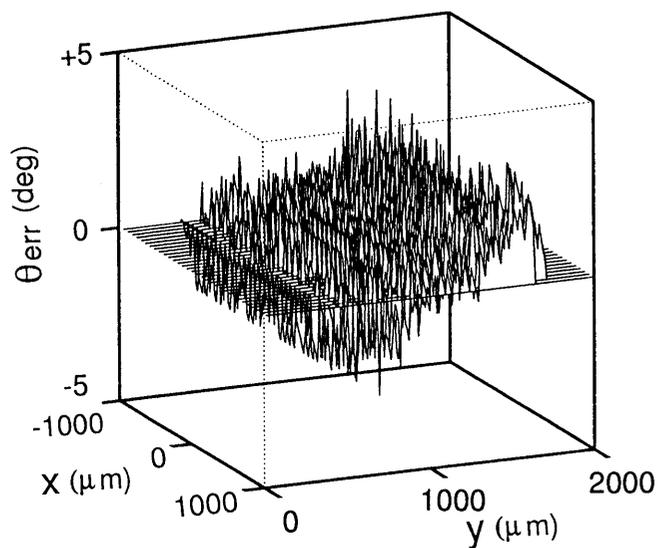
角度範囲	7 ~ 44 度
角度精度	3 度
計測領域	2 × 2 mm
最短計測間隔	0.3 秒



図は x 軸周りに 90 度
回転して表示



(a) 角度計測値



(b) 角度計測値と既知形状から求めた角度との差

図 7.10 露光条件の数 n が 2 の場合の計測結果

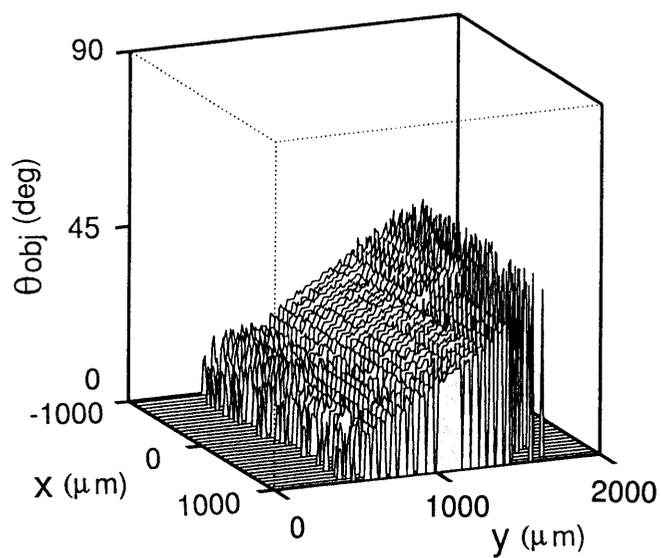


図 7.11 露光条件の数 n が 1 の場合の計測結果

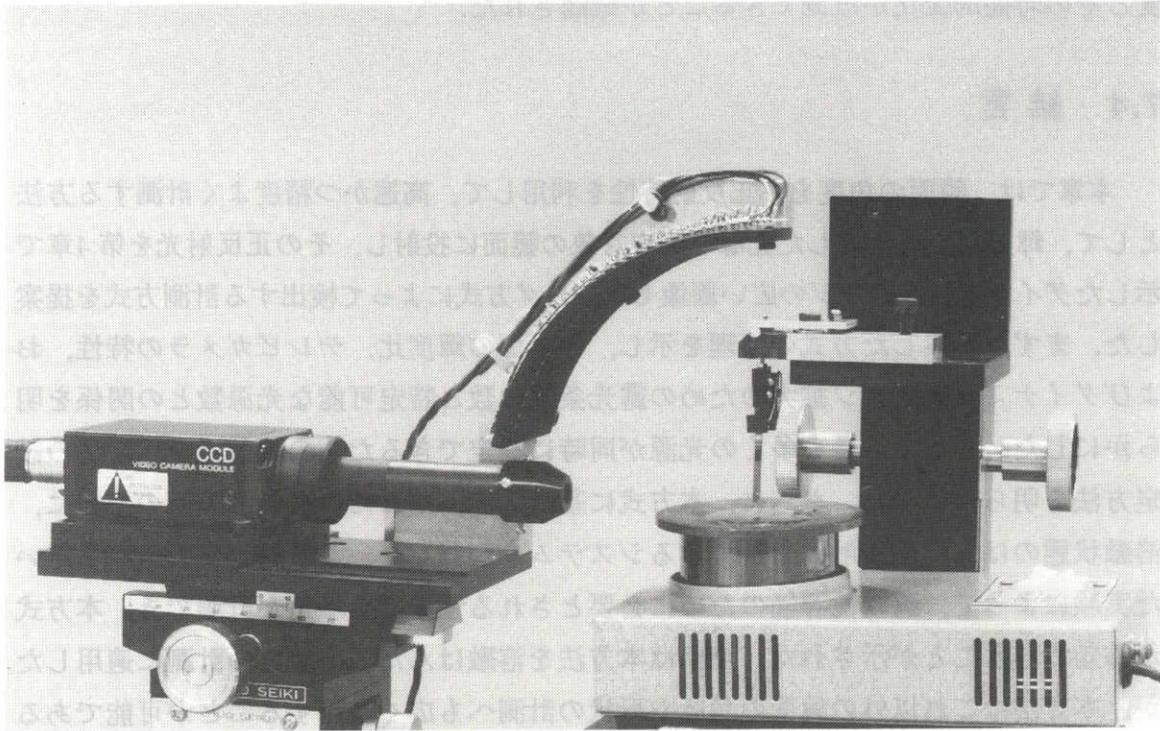


図 7.12 はんだ計測の様子（装置構成は図 7.5を参照）

7.3.4 溶融はんだ接触角の計測

(a) 実験方法

上述の計測システムを用いて、溶融はんだの接触角計測を行った。はんだは必ず含有率 63% の鉛すず共晶はんだを用い、フラックスには非ハロゲン系のものを用いた。また、試験片には幅 10mm、長さ 30mm、厚さ 0.3mm の銅板を用いた。温度を摂氏 230 度に制御したはんだ浴に試験片を浸漬し、浸漬直後から 1 秒間隔ではんだ鏡面の角度を計測した。図 7.12 に、計測の様子を示す。

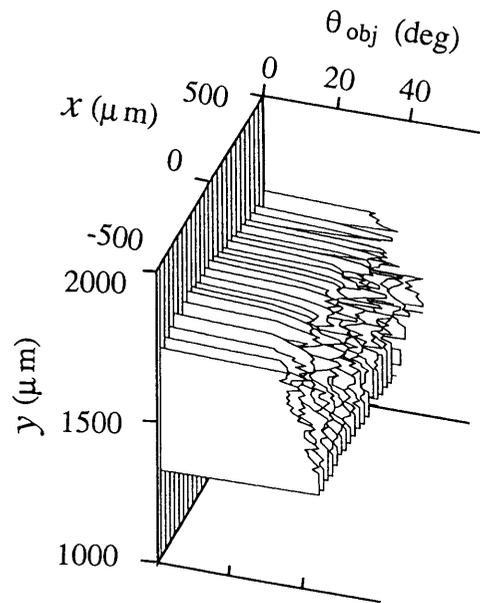
(b) 実験結果

計測結果の一例として、浸漬 2 秒後のはんだの角度分布を図 7.13(a) に示す。また、 $x=0$ (μm) における $y-z$ 断面での角度の時間的変化を図 7.13(b) に、この角度を y 方向に積分して求めた断面形状を図 7.13(c) に示す。これらの図において、 y 軸の原点は、はんだ液面である。なお、 y がおよそ $1400\mu\text{m}$ 以下の領域では、鏡面の角度が計測可能な最大角度 44 度を超えている。以上のように、本計測方式を用いること

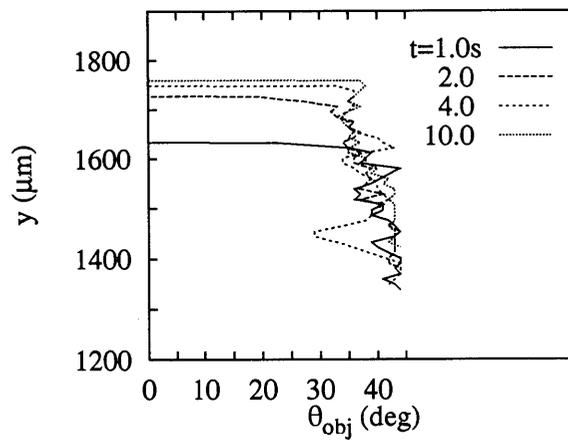
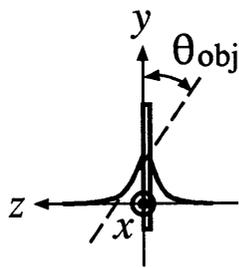
によって、はんだ浴に試験片を浸漬したときに形成される溶融状態のはんだ鏡面の角度とその時間的变化が計測できることが確認された。

7.4 結言

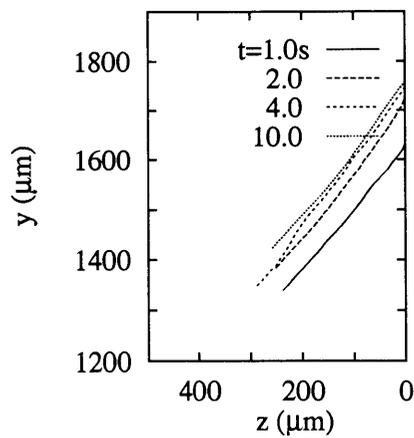
本章では、鏡面の角度を、正反射特性を利用して、高速かつ精度よく計測する方法として、輝度比で符号化した光源を測定対象の鏡面に投射し、その正反射光を第4章で示したダイナミックレンジの広い画像センシング方式によって検出する計測方式を提案した。まず、提案した方式の原理を示し、各光源の輝度比、テレビカメラの特性、およびダイナミックレンジ拡大のための露光条件の数と特定可能な光源数との関係を明らかにした。そして、最も多くの光源が同時に特定できるための、最適な輝度比の設定方法を明らかにした。さらに、本方式に基づいて、はんだの濡れ性評価のために、溶融状態のはんだの接触角を計測するシステムを製作した。この計測システムを用いた実験によって、濡れ性評価のために必要とされる性能で接触角が計測でき、本方式が有効であることが示された。今回は本方法を溶融はんだの接触角の計測に適用したが、本方法はこれ以外の鏡面の角度や形状の計測へも広く応用することが可能であると考えられる。



(a) $t = 2.0$ 秒における角度分布



(b) $x=0$ (μm) における $y-z$ 断面の角度の時間的变化



(c) $x=0$ (μm) における $y-z$ 断面の形状の時間的变化

図 7.13 はんだ計測結果の一例

第 8 章

結 論

8.1 本研究の成果

マシンビジョンは、すでに産業分野で広く実用化されているが、一般の環境下で任意の対象や情景を認識することは難しく、適用できる環境条件や対象物には大きな制限があることが問題であった。このようにマシンビジョンが適用できる範囲に大きな制限がある原因には、センシングにおける問題と認識処理における問題とが挙げられた。本研究では、これらのうち、画像のセンシングに着目し、新しい画像センシング法の開発により、照明環境の変動に強いマシンビジョンを実現することを目的とした。

本研究では、対象物がもつ光沢のために認識処理が難しくなる問題と、照明環境が変動して画像のセンシング時にセンサの出力が飽和するために認識処理が難しくなる問題とを取り上げ、これらに対して2種類の画像のセンシング法を提案した。そして、これらの画像センシング法を、自動車産業におけるいくつかの問題に適用して、その有効性を明らかにした。

本論文では、これらを、第2章から第7章までの6章構成で述べた。以下では、本研究で得られた成果を章ごとにまとめて述べる。

第2章では、画像センシングにおける第1の問題として、表面反射成分が対象物の情報が含まれる内部反射成分に対して雑音となる問題を取り上げた。その解決手法として、誘電体対象物からの反射光を、偏光による表面反射率の差を用いて、光沢の原因である表面反射成分と対象物についての情報を含む内部反射成分とに分離する方法を導出した。

第3章では、第2章の方法を屋内自律走行車の視覚システムに適用し、床面の光沢の影響を受けなくするために、光沢成分を除去する機能を持った自律走行車用視覚システムについて述べた。光沢成分を除去した画像が得られる視覚システムを液晶を利

用して実現する方法を提案し、この方法による視覚システムを試作して性能を評価した。そして、光沢のある環境下であっても白線が安定に検出できることを示した。

第 4 章では、画像センシングにおける第 2 の問題として、テレビカメラの明るさのダイナミックレンジの問題を取り上げた。ダイナミックレンジの広い画像センシングを目的に、異なる露光条件の撮像画像の合成によってダイナミックレンジを拡大する原理を示し、 α 倍ずつ n 種類に露光条件を変えて撮像してそれらを合成することで、テレビカメラ自体のダイナミックレンジの α^{n-1} 倍のダイナミックレンジの画像が得られることを示した。画像合成のアルゴリズムを検討し、特性変動が避けられない実際のテレビカメラでも良好に働く合成アルゴリズムを示し、実験によりその有効性を検証した。以上により、テレビカメラのダイナミックレンジを拡大した画像センシング方法を示した。

第 5 章では、第 4 章で示した方法を、自動車の走行環境認識のための視覚システムへ応用した。まず、輝度の測定により、日の出から日没までの日中の走行環境のためには、 10^4 のダイナミックレンジが必要とされることを示した。そして、シャッタースピードの異なる画像を単一の撮像素子で順次撮像し、第 4 章で述べた方式によってテレビカメラのダイナミックレンジを拡大した、視覚システムを試作した。移動物体の連続画像の撮像を可能にするために、シャッタースピードの異なる画像を短い時間間隔で撮像し、これらの画像の合成処理を実時間で行うために、専用のハードウェアを開発した。この視覚システムによる実走行による評価実験の結果、太陽光がカメラに直接入射する場合を除いて、従来のテレビカメラに比べて良好な画質の画像が得られた。そして、屋外のさまざまな照明環境においても対象物のエッジが確実に抽出できることを示し、ダイナミックレンジを拡大した視覚システムの有効性を確認した。

第 6 章では、第 4 章で示した画像センシング法を、FA の分野へ応用し、照明環境の変動に強い部品位置決め視覚システムについて述べた。これは、明るさが変化しても画像情報が欠落しないよう、対象部品の撮像に広ダイナミックレンジ視覚センサを用いたものである。試作した位置決め視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性を、撮像に従来のテレビカメラを用いた場合との比較により評価した。その結果、工場環境を想定した、照度を 500 lx から 10,000 lx まで変化させたときの部品位置の認識率は、実験で得られた各々 105 枚のサンプル画像について、従来のテレビカメラを用いた場合には約 90% であったのに対し、広ダイナミックレンジ視覚センサを用いた本方式では 100% となった。これらの評価実験により、本位置決め視覚システムの有効性を確認し、テレビカメラのダイナミックレンジ拡大が視覚システムの照明環境の変動に対するロバスト性の向上に極めて有効であることを明らかにした。

第7章では、第4章で示した明るさのダイナミックレンジの広い画像センシング技術の応用として、照明環境の変動に反射光が強い影響を受ける金属鏡面の形状のセンシングについて述べた。本章では、鏡面の角度を、正反射特性を利用して、高速かつ精度よく計測する方法として、輝度比で符号化した光源を測定対象の鏡面に投射し、その正反射光を第4章で示したダイナミックレンジの広い画像センシング方式によって検出する計測方法を提案した。まず、提案した方式の原理を示し、各光源の輝度比、テレビカメラの特性、およびダイナミックレンジ拡大のための露光条件の数と特定可能な光源数との関係を明らかにした。そして、最も多くの光源が同時に特定できるための、最適な輝度比の設定方法を明らかにした。さらに、本方式に基づいて、はんだの濡れ性評価のために、熔融状態のはんだの接触角を計測するシステムを製作した。この計測システムを用いた実験によって、濡れ性評価のために必要とされる性能で接触角が計測でき、本方式が有効であることを示した。

以上が本研究で得られた成果であり、画像センシング法の工夫によって、マシンビジョンが照明環境の変動に弱いという問題が解決でき、また解決できる可能性が強いことを、自動車産業におけるいくつかの応用により明らかにすることができた。

8.2 今後の課題

産業の分野でこれまでに実用化されているマシンビジョン技術は、膨大な実験と実績に裏付けされた実時間性と信頼性の高い技術である [5]。この意味で、本研究で提案した画像センシング法が今後種々の分野に広く浸透していくためには、評価実験をさらに重ねつつ、現場での実績を積んでいくことが重要であると考えられる。また、それとともに、速度や解像度などの性能のさらなる改善を進めていくことが必要である。

これまでマシンビジョンを照明環境の変動に強くできなかった障害(ボトルネック)は、主にセンシングの段階にあったといえよう。本研究は、このセンシングに注目して問題の解決を試みたものである。本研究では、認識処理については、第6章で述べた部品位置決めのような簡単な問題については扱ったが、第5章で述べた自動車の走行環境認識のような複雑なものについては取り扱わなかった。前者のように、センシング法の工夫によって、それほど複雑な認識処理を用いなくても照明環境の変動に強いマシンビジョンが実現できる例もあった。しかし、照明環境の変動に弱いという問題の多くは、その解決にセンシング法の工夫が必要不可欠であるが、それのみによって解決できるものではないと思われる。従って、照明環境を仮定しない認識処理法の開発が、次の研究課題として挙げられる。センシング法の発達は、認識処理の課題を

明らかにし、その解決を要求する。照明環境の変動に強いマシンビジョンの実現のためには、センシングと認識処理が、車の両輪のようになって発展していかなければならないと考えられる。

付 録

式 (2.19) の導出

図 A.1 に示すように，点 A から角度 φ だけ離れた点 B から角度 θ_r で反射した光の p 成分の電界ベクトル E_p と，偏光板の偏光面 (点 A における法線 N と線分 AC が張る面) とが成す角 ζ は，

$$\tan \zeta = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{\tan^2 \theta_r + \cos^2 \varphi}}$$

である．一方，角度 φ および反射角 θ_r と水平画角 θ_X との関係は，

$$\sin(\theta_X/2) = \sin \theta_r \sin \varphi$$

である．従って，

$$\tan \zeta = \frac{\cos \theta_r \sin(\theta_X/2)}{\sqrt{\sin^2 \theta_r - \cos^2 \theta_r \sin^2(\theta_X/2)}}$$

となり，式 (2.19) が得られる．

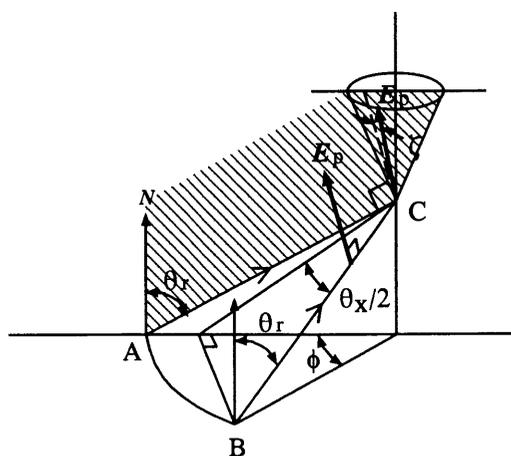


図 A.1 角 ζ を示す図

式(7.4)の導出

式(7.2)より,

$$\frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} = \frac{\tilde{I}_{Ai} - N_{Ai}}{\tilde{I}_{Bi} - N_{Bi}}$$

であり, この両辺の対数をとると,

$$\log \frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} = \log \frac{\tilde{I}_{Ai} - N_{Ai}}{\tilde{I}_{Bi} - N_{Bi}} = \log \frac{\tilde{I}_{Ai}}{\tilde{I}_{Bi}} + \log \frac{1 - N_{Ai}/\tilde{I}_{Ai}}{1 - N_{Bi}/\tilde{I}_{Bi}}$$

となる. 同式の右辺第2項は, 式(7.3)より,

$$\log \frac{1 - N_{Ai}/\tilde{I}_{Ai}}{1 - N_{Bi}/\tilde{I}_{Bi}} < \log \frac{1 + c}{1 - c}$$

である. 従って, 光源 i が特定できるための, テレビカメラの雑音の条件は,

$$\left| \log \frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} - \log \frac{\tilde{I}_{Ai}}{\tilde{I}_{Bi}} \right| < \log \frac{1 + c}{1 - c}$$

である. よって, 任意の2つの光源 i と j (但し, $i \neq j$) が区別して特定できるための条件は,

$$\left| \log \frac{I_{Ai}}{I_{Bi}} - \log \frac{I_{Aj}}{I_{Bj}} \right| \geq 2 \log \frac{1 + c}{1 - c}$$

となり, 式(7.4)が得られる.

参考文献

- [1] E. L. Hall, Computer image processing and recognition, Academic Press, New York, 1979.
- [2] 平井有三, 視覚と記憶の情報処理, 培風館, 1995.
- [3] 谷内田正彦, ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990.
- [4] 江尻正員, 大田友一, 池内克史, マシンビジョン, 昭晃堂, 1990.
- [5] 江尻正員, 工業用画像処理, 昭晃堂, 1988.
- [6] 柳川博彦, 山田元一, “画像処理技術の自動車産業への応用の現状と将来”, 自動車技術, Vol. 46, No. 2, pp. 56-61, 1992.
- [7] L. G. Roberts, Machine perception of three-dimensional solids, Optical and electro-optical information processing, J.T.Tippett et al. (eds.), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp.159-197, 1965.
- [8] M. Ejiri, T. Uno, M. Mese, and S. Ikeda, “A process for detecting defects in complicated patterns”, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 2, Nos. 3 and 4, pp.326-339, 1973.
- [9] S. Kashioka, M. Ejiri, and Y. Sakamoto, “A transistor wire-bonding system utilizing multiple local pattern matching techniques”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 6, No. 8, pp.562-570, 1976.
- [10] Richard S. Hunter, The measurement of appearance, A wiley-interscience publication, John wiley & sons, Inc., USA, 1975.
- [11] 日本規格協会 編, JIS用語辞典 電気編, 日本規格協会, 1984.
- [12] 物理学辞典編集委員会 編, 物理学辞典, 培風館, 1984.

- [13] G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade, "Using a color reflection model to separate highlights from object color", Proc. of 1st Int. Conf. on Computer Vision, pp. 145–150, 1987.
- [14] L. B. Wolff, "Using polarization to separate reflection components", Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. CVPR '89, pp. 363–369, 1989.
- [15] M. Born and E. Wolf, 草川, 横田 訳, 光学の原理 I, pp. 59–65, 東海大学出版会, 1974.
- [16] 石川繁樹, 瀧波栄作, 小沢慎治, "白線認識を利用した無人搬送車における視覚誘導の一方式", 信学論 D, Vol. J69-D, No. 4, pp. 580–590, 1986.
- [17] S. Ishikawa, H. Kuwamoto, and S. Ozawa, "Visual navigation of an autonomous vehicle using white line recognition," IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., Vol. PAMI-10, No. 5, pp. 743–749, 1988.
- [18] 坪内孝司, 油田信一, "地図とカラー画像を利用した屋内環境を移動するロボットのための視覚システム構成法", 信学論 D, Vol. J70-D, No. 8, pp. 1685–1688, 1987.
- [19] 辻 三郎, "室内環境自律移動ロボットの視覚", ロボット誌, Vol. 5, No. 6, pp. 470–474, 1987.
- [20] 佐藤 進, 液晶とその応用, pp. 103–106, 産業図書, 1984.
- [21] テレビジョン学会 編, 固体撮像デバイス, 昭晃堂, 1986.
- [22] Savvas G. Chamberlain and Jim P. Y. Lee, "A novel wide dynamic range silicon photodetector and linear imaging array", IEEE Trans. Electron Devices., Vol. ED-31, pp. 175–182, 1984.
- [23] DALSA 社 CCD image sensors データブック, 1989.
- [24] 山田哲生, 池田勝己, 鈴木信雄, "ITCCD のブルーミング防止と広ダイナミックレンジ特性", 1985 テレビ学全大, No. 3-14, pp. 69–70, 1985.
- [25] Ran Ginosar and Yehoshua Y. Zeevi, "Adaptive sensitivity / intelligent scan imaging sensor chips", SPIE Vol. 1001 Visual Communications and Image Processing '88, pp. 462–468, 1988.

- [26] 高田謙二, 石田耕一, 中村里之, 草鹿秦, 岩本剛志, 野村慶一, 鮫島幸一, 西田直樹, 宮武茂博, “対数変換 CCD ラインセンサ”, テレビジョン学会誌, Vol. 49, No. 2, pp. 169–175, 1995.
- [27] Rangaraj M. Rangayyan and Richard Gordon, “Expanding the dynamic range of x-ray videodensitometry using ordinary image digitizing devices”, Appl. Opt., Vol. 23, No. 18, pp. 3117–3120, 1984.
- [28] 橋本 理, 加藤博一, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, “カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出”, 信学論 D, Vol. J74-D-II, No. 6, pp. 727–735, 1991.
- [29] 松山隆司, “画像理解のための多角的情報の統合”, 第 19 回画像工学コンファレンス, No. 4-1, pp. 97–102, 1988.
- [30] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊, “多重絞りカラー画像の解析”, 情処論, Vol. 32, No. 10, pp. 1338–1348, 1991.
- [31] 森脇耕介, “適応露光によるカラー画像の入力方式”, 信学論 D-II, Vol. J76-D-II, No. 9, pp. 1894–1901, 1993.
- [32] 菰淵寛仁, “広ダイナミックレンジ撮像技術”, 第 7 回画像入力技術シンポジウム講演予稿集, pp. 85–92, 1995.
- [33] 農宗千典, 小沢慎治, “高速道路走行画像からの消失点推定に基づく実時間白線検出”, 電学論 C, Vol. 113, No. 2, pp. 139–148, 1993.
- [34] 農宗千典, 小沢慎治, “パターン・画像情報の処理利用技術 I. 自動車用マシンビジョン”, 電学論 C, Vol. 113, No. 12, pp. 1038–1043, 1993.
- [35] Ernst. D. Dickmanns and Volker Graefe, “Dynamic monocular machine vision”, Machine Vision and Applications, No. 1, pp. 223–240, 1988.
- [36] 尾崎 暢, 大空真由美, 平塚芳隆, “自律走行車用視覚情報処理システム”, 情処学研報, CV-69-8, pp. 1–8, 1990.
- [37] T. Ozaki, M. Ohzora, and K. Kurahashi, “An image processing system for autonomous vehicle,” Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol. 1195, pp.256–266, 1990.
- [38] 丸屋祥一, 久田見篤, 高橋弘行, 奥野昭宏, “自律走行実験車の開発”, 第 5 回知能移動ロボットシンポジウム, pp. 25–30, 1990.

- [39] Y. Maruya, H. Takahashi, and A. Kutami, "Development of an autonomous on-road vehicle," 6th International Pacific Conference on Automotive Engineering, Vol. 2, pp. 833–839, 1991.
- [40] 実吉敬二, 塙圭二, 喜瀬勝之, "三次元画像処理による道路形状と障害物の認識", 自動車技術, Vol. 46, No. 4, pp. 23–27, 1992.
- [41] 鈴木敏彦, 青木啓二, 橘彰英, 森部弘, 井上博允, "コンピュータビジョンによる自動運転システム", 自動車技術会, 学術講演会前刷集 924, pp. 161–164, 1992.
- [42] 青野和彦, 真保俊也, 早船一弥, "走行環境認識技術の動向", 自動車技術, Vol. 48, No. 9, pp. 54–59, 1994.
- [43] Matthew A. Turk, David G. Morgenthaler, Keith D. Gremban, and Martin Marra, "VITS-A vision system for autonomous land vehicle navigation", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., Vol. 10, No. 3, pp. 342–361, 1988.
- [44] 森 英雄, 小谷信司, 石黒浩, 安富敏, 芽野之雄, "構内道路を走行する自律移動ロボット(移動ロボットの一戦略—晴信4号機)", ロボット誌, Vol. 5, No. 5, pp. 29–42, 1987.
- [45] 八木康史, 浅田稔, 谷内田正彦, 辻三郎, "動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識", 信学論D, Vol. J69-D, No. 6, pp. 967–974, 1986.
- [46] 白井良明, 大田友一, "自律移動ロボットにおけるセンシング技術", ロボット誌, Vol. 5, No. 5, pp. 391–397, 1987.
- [47] Charles Thorpe, Martial H. Hebert, Takeo Kanade, and Steven A. Shafer, "Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Nablabs", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., Vol. 10, No. 3, pp. 362–373, 1988.
- [48] 黒木義博, 長田康行, "視覚ロボットによる位置決め", ロボット誌, Vol. 9, No. 3, pp. 369–373, 1991.
- [49] T. Uno, S. Ikeda, H. Ueda, and M. Ejiri, "An industrial eye that recognize hole position in a water pump testing process", Computer Vision and Sensor-Based Robots, edit. G. G. Dodd and L. Rossal., Plenum Press, 1979.
- [50] 秦 清治, "ロボットビジョンの産業への応用", ロボット誌, Vol. 10, No. 2, pp. 185–189, 1992.

- [51] Gerald J. Agin, Richard O. Duda, "SRI vision research for advanced industrial automation", Second USA-JAPAN Computer Conference, pp. 113-117, 1975.
- [52] Nobuyuki Ohtsu, "A threshold selection method from gray-level histograms", IEEE Trans Syst., Man and Cybern., Vol. SMC-9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- [53] 塩 昭夫, "情景中文字の検出のための動的 2 値化処理法", 信学論 D, Vol. J71-D, No. 5, pp. 863-873, 1988.
- [54] 前田英作, 高橋裕子, 石井健一郎, "環境変動にロバストな物体有無判定法", 信学論 D-II, Vol. J74-D-II, No. 12, pp. 1731-1740, 1991.
- [55] A. Shio, "An automatic threshold algorithm based on an illumination-in dependent contrast measure", Proc. IEEE Computer Soc. Conf., Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, June 1989.
- [56] 高橋裕子, 塩 昭夫, "光の強度比に注目した edge 分類法", 情報処理学会研究会資料, CV-61-1, pp. 1-8, 1989.
- [57] William M. Silver, "Normalized correlation search in alignment, gauging, and inspection", SPIE, Vol. 755, Image Pattern Recognition: Algorithm Implementations, Techniques, and Technology, pp.23-34, 1987.
- [58] 秦 清治, 上原久美, 花房秀行, "ロバストな画像比較手法の開発", 画像応用技術, Vol. 10, No. 3, pp. 9-14, 1995.
- [59] 橋本昌彦, 宮治伸, 松浦英文, 塚本一義, "反射照明方式による電子部品の位置認識", 第 39 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp. 417-418, 1995.
- [60] R.J.Klein Wassink (竹本正, 藤内伸一 監訳), ソルダリング イン エレクトロニクス, 日刊工業新聞社, 1990.
- [61] H. J. Albrecht, W. Scheel, and T. Freund, "The wetting angle measuring unit: a new optoelectronic solderability tester", Brazing and Soldering, No. 8, pp. 8-15, Spring 1985.
- [62] 漢野救泰, 中野幸一, 渡辺弥寿夫, "金属反射を持つ金属物体の面の認識", 信学技報, Vol. PRU87-83, 1987.
- [63] 寺師泰代, 白井良明, 越川和忠, "偏光を用いた光沢物体の表面形状の認識", 電総研彙報, Vol. 50, No. 1, pp. 86-95, 1986.

- [64] A. C. Sanderson, L. E. Weiss, and S. K. Nayar, "Structured highlight inspection of specular surfaces", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 10, No. 1, pp. 44–55, 1988.
- [65] K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. PAMI-3, No. 6, pp. 661–669, 1981.
- [66] 西野悦二, 白井良明, "投影光学系を用いた光度差ステレオ法による金属面の形状決定", *情処学コンピュータビジョン研報*, CV31-2, 1984.
- [67] 葉 雄英, 藤村貞夫, 山田範秀, "M 系列符号化格子光源の照明による鏡面物体の測定", *計測自動制御学論*, Vol. 26, No. 2, pp. 123–128, 1990.
- [68] 西村拓一, 藤村貞夫, 伊藤直史, 喜安千弥, "M 配列を用いた鏡面物体の三次元形状計測", *電学論 C*, Vol. 112-C, No. 2, pp. 97–101, 1992.
- [69] 汪 増福, 加藤博一, 佐藤宏介, 井口征士, "鏡面物体の 3 次元形状計測", *信学論 D-II*, Vol. J75-D-II, No. 7, pp. 1177–1186, 1992.
- [70] 秦 清治, 西山雅子, "カラーストライプ照明下でのステレオ視による鏡面形状の抽出", 第 8 回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集, pp. 103–108, 1992.
- [71] Y. Nakagawa, "Automatic visual inspection of solder joints on printed circuit boards", *SPIE*, Vol.336, Robot Vision, pp. 121–127, 1982.
- [72] S. Kobayashi, Y. Tanimura, and T. Yotsuya, "Identifying solder surface orientation from color highlight images", 16th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, No. 1, pp. 821–825, 1990.
- [73] 村岡建樹, "SMT におけるレーザ光線を応用したハンダ付外観検査装置の原理及び仕様紹介", *画像応用技術*, pp. 21–28, 1988.
- [74] H. Kawai, T. Hamada, H. Nakanishi, and S. Hata, "3-D shape measurement sensor for specular objects", *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 7, No. 3, pp. 221–224, 1995.
- [75] 和田正信, 中野朝安 (訳), *赤外線工学*, 近代科学社, pp. 15–20, 1963.

本研究に関する発表論文

論文題目	公表の方法及び時期	著者	関連の章
偏光による表面反射成分と内部反射成分の分離	電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J76-D-II, No. 11, pp. 2448-2451 (1993-11)	山田 啓一 中野 倫明 山本 新	第 2 章
液晶を用いた光沢除去のための視覚システム	電気学会論文誌 C, Vol. 113-C, No. 12, pp. 1087-1093 (1993-12)	山田 啓一 中野 倫明 山本 新	第 3 章
屋内自律走行車のための広ダイナミックレンジ視覚センサ	電気学会論文誌 C, Vol. 115-C, No. 3, pp. 396-402 (1995-3)	山田 啓一 中野 倫明 山本 新	第 4 章
車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式	電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J78-D-II, No. 10, pp. 1439-1449 (1995-10)	山田 啓一 中野 倫明 山本 新	第 4 章 第 5 章
輝度比符号化光源による鏡面の角度計測	電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J79-D-II, No. 3, pp. 374-384 (1996-3)	山田 啓一 山本 新	第 7 章
照明変動にロバストな部品位置決め用ロボット視覚システム	日本ロボット学会誌, (印刷中)	山田 啓一 中野 倫明 山本 新	第 6 章

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に際し、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻教授 工学博士 大熊 繁 先生に心より御礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり、数々の御指導と貴重な御助言を賜りました名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻教授 工学博士 鳥脇 純一郎 先生ならびに名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻教授 工学博士 大西 昇 先生に心より御礼申し上げます。

本研究は株式会社豊田中央研究所において行われたものであります。本研究の遂行と論文作成の機会を与えて下さいました当研究所代表取締役所長 理学博士 上垣外修己氏をはじめとする当研究所役員の方々ならびに当研究所システム2部 部長 高橋信明氏に深く感謝致します。

本研究の遂行ならびに論文作成にあたり終始懇切なる御指導と御配慮を賜りました当研究所システム2部画像情報研究室 室長 工学博士 山本 新 氏に心より御礼申し上げます。

また、本研究において終始懇切なる御教示と熱心な御討論を頂きました同研究室 研究員 工学博士 中野倫明 氏、(元)同研究室 主任研究員 工学博士 小関 修 氏ならびに同研究室関係各位に深く感謝致します。

さらに、貴重な御意見を賜りましたトヨタ自動車株式会社ならびにアイシン精機株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。