

画像特徴を用いた交通信号機の視認性定量化手法

木村文香*，高橋友和*，目加田慶人**，井手一郎*，村瀬洋*，宮原孝行***，玉津幸政***

*：名古屋大学大学院情報科学研究科，**：中京大学生命システム工学部，

***：株式会社デンソー

画像特徴を用いて交通信号機の視認性を定量化する手法を提案する．近年，ITSの実用化に伴い，車内で運転者に与えられる情報が増加している．しかし過度な情報提供は運転者の情報処理能力を超え，逆に危険であり，そのため，運転者に提供する情報を選択する必要がある．例えば，運転者から見た物体の視認性が低い場合のみ，運転者に提供する情報を選択する手法などが考えられる．そこで我々は，交通信号機に着目し，画像から交通信号機の視認性に関わる特徴を抽出し，特徴量を用いて交通信号機の視認性を定量化する手法を提案する．被験者実験により，提案した視認性指標が人間の知覚に比較的良好に対応していることを確認した．

1. はじめに

近年，最先端の情報通信技術や車載センサ類を用いた様々な運転支援技術の開発が活発に行われている．これらの技術を用いて車外環境を把握することで，走行環境情報の提供や危険警告，さらに運転補助といった支援が可能となる．車線維持[1]や車間維持[2]は既に実用化されており，音声やディスプレイ表示を通して，運転者に情報提供や警告が行われている．

しかし，各種運転支援技術の実用化に伴い，運転操作中に運転者に与えられる情報が，視覚的にも聴覚的にも確実に増加している（図1）．カーナビなど視覚情報提示機器を運転中に見ることは脇見運転につながり危険であるため，現在多くの支援技術が情報提供および危険警告に音声を使用している．しかし，視覚による情報提示よりは運転者に負担をかけないと言っても，音声による情報提示もやはり余分な負荷を運転者に与えることが報告されている[3]．そのため，各運転支援技術で運転者に与える情報を削減する必要がある．

運転者に提供する情報を選択するために，運転者の顔や目をカメラで撮影し，視線の動きから，運転者が見えていないものを判断して必要な情報を提供する技術が提案されている[4]．しかし，運転者の視線がある物体に向いていることと，運転者がある物体を認識していることは必ずしも一致しないため（意識の脇見[5]），視線の動きのみから運転者が物体を認識しているかどうかを判断し，情報の選択を行うことは困難である．

また，あらかじめ事故多発地点や踏み切りなどの情報をカーナビに登録しておくことで，該地点に接近した際に音声と画面表示で注意喚起を行うシステムも実用化されている．しかし，運転者の視界状況は天候や時間に大きく影響され時々刻々と変化する．そのため，前もって登録された場所のみでの情報提供では不十分である．

そこで我々は，運転者に提供する情報を選択する際に，運転者から見た物体の視認性を考慮することが必要であると考えた．具体的には，物体の視認性を認識することで，物体の視認性が低い場合に積極的に情報提供を行うシステムの実現を目指す．我々は物体として特に交通信号機に着目した．交通信号機は運転者に見やすいように設計されているが，それでもやはり交通信号機が見えにくいという状況を経験する．交通信号機を認識し，情報提供を行うシステムは既に提案されているが[6]，運転者は常に信号機の情報が必要としているわけではない．運転者は信号機が見えにくい局面でその情報を必要とし，見やすい状況ではあまり必要としない．交通信号機の視認性を認識すること



図1. 車内で運転者に与えられる情報の例

で、視認性が高い場面では情報提供を控え、視認性が低い場面でのみ情報提供を行うことが可能となる。そのようなシステムの実現のために、信号機の視認性を定量化する手法を提案する。

提案手法は、人間の視覚特性を考慮して、画像から交通信号機の視認性を決定付ける特徴を抽出し、最終的に視認性を値として出力する。

2. 交通信号機の視認性

運転者が交通信号機を“見えにくい”と感じる場面は様々である。我々は、運転者から見た交通信号機の視認性は、次の2通りに大別できると考える。

- (a) 信号機自体の見つけやすさ
- (b) 信号灯の見分けやすさ

前者は、視野の中でどれだけ信号機自体を見つげやすいかどうかを意味し、後者は、信号機は発見できた上で、さらに何色の信号灯が点灯中かがわかりやすいかどうかを意味する(図2)。本稿では、上記2つの観点から、交通信号機の視認性を定量化する。以下では視認性に影響を与える要因を視認性決定要因と呼び、視認性を定量化した値のことを、視認性指標と呼ぶ。

2.1 信号機の見つけやすさ

人間の視覚が対象物の存在を知覚するためには、対象物の輝度とその近傍背景の輝度差が視覚の識別できる輝度差の最小値より大きくなければならない。この対象物を知覚するために必要な輝度差の閾値は、輝度差弁別閾と呼ばれている[7]。輝度差弁別閾は、観測者の視覚能力や心理条件、対象物の性質や視野の輝度条件など、様々な要因により変化し、対象物の視認性に影響を与える。

本稿では、輝度差弁別閾に影響を与える要因のうち、静止画像から特徴量として抽出可能である要因を用いて、交通信号機の見つけやすさに関する指標を計算する。見つけやすさ指標の計算をするうえで想定する視

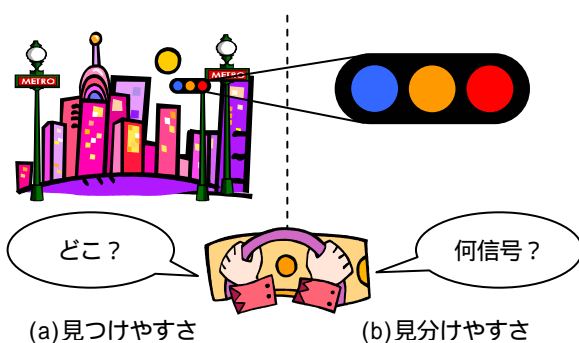


図2. 交通信号機の視認性

表1. 本稿で想定する視認性決定要因

視認性	視認性決定要因	
信号機の見つけやすさ	昼	・信号機の輝度・色度 ・背景の輝度・色度 ・背景のテクスチャ特徴
	夜	・周辺視野のグレア源 ・色光の誘目度
信号灯の見分けやすさ	昼	・3色の信号灯の輝度比

認性決定要因を表1上半分に示す。

交通信号機をとりまく環境は、昼と夜で大きく異なり、そのため輝度差弁別閾に影響を与える要因も異なる。そこで、見つけやすさの定量化には、昼と夜で別々の処理を行う。

2.2 信号灯の見分けやすさ

日中太陽光が直接信号灯を照らしている時、全ての信号灯が点灯中のように見えることがある。これは擬似点灯と呼ばれ、特に従来の電球式信号灯で発生しやすい。擬似点灯が発生すると、本来点灯していないはずの信号灯の輝度も上昇し、点灯中の信号灯と、非点灯中の信号灯との間の輝度の差が減少する。そのため、何色が点灯中かが見分けにくくなる。

輝度 B の領域に隣接する領域の輝度を $B+AB$ で表し、 AB がある値 AB' より大きい場合に輝度の相違を識別できたとする。このときの AB'/B を明度識別閾値と呼ぶ[8]。以下では AB/B を輝度比と呼び、見分けやすさの定量化に用いる(表1下半分)。

信号灯の見分けやすさが低下する主な原因は、太陽光を原因とする擬似点灯であるため、夜間は信号機を見つけることさえできれば、何色が点灯中かは容易に判断ができる。そこで、見分けやすさに関しては、昼間についてのみ定量化する。

3. 交通信号機の視認性定量化手法

視認性決定要因が交通信号機の視認性に与える影響の度合いを、画像処理を用いて特徴量として抽出し、交通信号機の視認性を定量化する。視認性は“見つけやすさ”と“見分けやすさ”の2つの観点で定量化する。交通信号機に関する語句の定義を図3に示す。

3.1 見つけやすさの定量化

3.1.1 昼間の見つけやすさ

人間の視覚は、対象物の特徴と背景の特徴が類似し

ている場合、対象物の存在を知覚しにくく、逆に特徴が異なっている場合、対象物の存在を知覚しやすい傾向がある。図 4(a)よりも図 4(b)の方が信号機を見つけにくいと感じるのは、(b)では背景のテクスチャが複雑なことに加えて、信号機と背景の色特徴が類似しているためである。そこで本研究では、色特徴に加えて、テクスチャ特徴にも着目し、昼間の見つけやすさを定量化する。色特徴とテクスチャ特徴の抽出には、カラー共起行列を用いる[9]。カラー共起行列は濃度共起行列に色情報を加えた共起行列である。

処理手順: まず、信号機の近傍領域をカラーテクスチャに基づいて大まかに分割する。領域分割には Dengらが提案した JSEG 手法を用いる[10]。そして、信号機に隣接する背景領域のみ、そのカラー共起行列を求め、信号機領域と各隣接背景領域のカラー共起行列を求め、行列の各要素の差の二乗和 d_K を計算する。色空間には均等色空間である CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間を用い、各領域に対して、 L^* 、 a^* 、 b^* から 2 つの軸を選択した合計 3 つの共起行列を作成する。共起行列作成のために必要な色空間の量子化には[11]の手法を用いた。 M_o と M_n をそれぞれ信号機領域と隣接背景領域のカラー共起行列とすると、 d_K は次式で表される。

$$d_K = \sum_i^I \sum_j^J (M_{oij}^K - M_{nij}^K)^2 \quad (1)$$

ここで、 I, J は色空間の各軸の量子化数(行列の行数と列数)を表す。また、 $K = \{(L^*, a^*), (L^*, b^*), (a^*, b^*)\}$ であり、共起をとる色空間の軸の組み合わせ方を表す。式(1)を用い、昼間の見つけやすさに関する指標を次式で定義する。

$$X_{day} = \max_K \sum_n^N w_n d_K \quad (2)$$

ここで、 N は信号機に隣接する分割背景領域の数、 w は信号機領域と背景領域の境界画素数である。

3.1.2 夜間の見つけやすさ

夜間の場合は、視野内に、信号機と同等の輝度、もしくはそれ以上に高輝度の物体が含まれていると、信号機を見つけにくくなる(図 2(b))。これは周辺視野に存在するグレア源の影響である[4]。グレア源とは、ヘッドランプやネオンのような輝度の高い物体のことを指し、グレア源の存在によって、目の不快感や視覚機能の低下が生じる。これにより本来視認したいはずの対象物の視認性が低下する。グレア源の輝度が高いほど、また、その視野内での位置が視認したい対象物に近いほど、対象物の視認性は低下する。グレア源が対象物の視認性に与える影響の度合いは、等価光幕輝度として次式で定義されている[4]。

$$L_{eq} = \frac{kE}{\theta^2} \quad (3)$$

ここで、 E はグレア源の照度[lx]、 θ は対象物とグレア源のなす角を表す。また、 k は測光単位や角度の単位、観測者の年齢に依存する係数である。以下の実験ではメートル系で一般的に用いられる値 $k = 10$ を使用する。視野内に複数のグレア源が存在する場合、各グレア源の等価光幕輝度の加算が成立し、その値が大きいほど、対象物の視認性が低下する。

また、光は、その色によって“注意の引きやすさ”が異なる。この性質は色光の誘目度と呼ばれ、視野内に対象物以外に誘目度が高い色の物体が存在すると、そちらに注意を引かれ、対象物の視認性が低下する。

そこで、本稿では、グレア源の等価光幕輝度に色光の誘目度を乗算して、夜間の見つけやすさ指標とする。

処理手順: 入力画像から判別分析法を用いて閾値を決定し、閾値以上の領域をグレア源として検出する。グレア源の照度 E を、グレア源を構成する領域の平

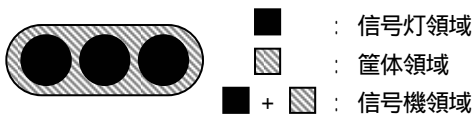


図 3. 交通信号機に関する語句の定義



(a) 見つけやすい (b) 見つけにくい

図 4. 昼間の見つけやすさ



(a) 見つけやすい (b) 見つけにくい

図 5. 夜間の見つけやすさ

表 2 . 色光の誘目度と対応する誘目度関数 $C(H,S)$ の値

色光	誘目度 (文献[12])	条件		$C(H,S)$ (=1.29)
		彩度 S	色相 H	
白	-0.29	$S < 0.1$	$0 < H < 360$	-0.29+
赤	1.00	$S > 0.1$	$H < 20, H > 350$	1.00+
黄	0.26		$20 < H < 70$	0.26+
青	0.43		$230 < H < 270$	0.43+
緑	-0.16		$90 < H < 135$	-0.16+

均輝度 E' で近似し、グレア源と対象物のなす角 θ を、画像中でのグレア源領域の重心と点灯中の信号灯領域の重心の間のユークリッド距離 θ' で近似し、式(2)から各グレア源の等価光幕輝度を計算する。

誘目度には文献[12]で報告されている値を用いる。画素値を HSV 表色系に変換し、各グレア源の平均色相 H と平均彩度 S を計算し、 H と S の値に応じて誘目度を決定する(表 2)。このとき、白色光の誘目度が 1.0 となるように、各色光の誘目度の値に定数を加算する。

誘目度関数を $C(H_j, S_j)$ 、画像に含まれるグレア源の数を J とし、夜間の見つけやすさに関する指標を次式で定義する。

$$X_{night} = \sum_j \left\{ \frac{kE'_j}{\theta_j^2} \times C(H_j, S_j) \right\} \quad (4)$$

3.2 見分けやすさの定量化

3.2.1 昼間の見分けやすさ

日中、擬似点灯が発生した場合、どの信号灯が点灯中なのか判断が難しくなる(図 6(b))。また擬似点灯が生じにくいとされている LED 式の信号灯でも、光が直接信号灯に当たると、信号灯の色味が薄まり、やはり見分けにくくなる。人間の視覚は、隣り合う光源の輝度比が小さいと、それらの輝度差を認識することが困難となる。そこで、点灯中の信号灯と、非点灯中の信号灯の間の輝度比を用いて、見分けやすさを定量化する。

処理手順: 入力画像から、各信号灯領域の画素の平均輝度を計算し、点灯中の信号灯とそれ以外の信号灯



(a) 見分けやすい (b) 見分けにくい

図 6. 昼間の見分けやすさ

表 3 . 指標計算用画像の仕様

使用カメラ	Lumix FZ30 (Panasonic 製)
画像サイズ	1,600×1,200pixels
ビット数	RGB 各 8bits
絞り	7.1
シャッタースピード	(昼)1/800, (夜)1/400

表 4 . 実験用画像の作成条件

指標	画像の条件	
信号機の見つけやすさ	昼	同一の信号機画像を様々な背景画像に合成
	夜	画像内で点灯中の信号灯の位置・大きさは等しい
信号灯の見分けやすさ	昼	筐体の色は灰色

の間の輝度比を計算する。輝度比が小さいほど見分けにくいことから、輝度比の最小値を昼間の見分けやすさの指標とする。点灯中の信号灯の平均輝度を b 、それ以外の信号灯の平均輝度を $b_i (i=1,2)$ とし、昼間の見分けやすさに関する指標を次式で定義する。

$$Y_{day} = \min_i \frac{b - b_i}{b} \quad (5)$$

4. 評価実験と考察

提案手法により計算された視認性指標が、運転者から見た交通信号機の視認性と一致しているかどうかを確認するために、被験者実験による評価を行った。

4.1 視認性指標の計算

提案手法を実画像に適用して、視認性指標を計算した。各指標は 0 から 1 の値となるように正規化を行い、値が大きいくほど見つけやすい、見分けやすいとした。

前方向き車載カメラで撮影された静止画像を用いて、3 章で述べた視認性指標の値を計算した。実験に使用した画像の仕様を表 3 に示す。提案手法で考慮した視認性決定要因以外の影響を取り除くため、実験に使用する画像に条件を設けた(表 4)。また、点灯中の信号灯の色の違いによる影響を取り除くため、青信号が点灯中の画像のみを用いて実験を行った。

指標の計算に必要な信号機や信号灯の切り出しは人手で行った。この処理は文献[6]や[13]の手法によって自動化が可能である。

実験に使用した画像例を図 4 から図 6 に、これらの画像に対して提案手法により計算された視認性指標を表 5 に示す。

表5. 画像例と提案手法により計算された指標の値

指標		図番号	指標の値
信号機の 見つけやすさ	昼	図 4(a)	0.70
	X_{day}	図 4(b)	0.07
	夜	図 5(a)	0.99
	X_{night}	図 5(b)	0.26
信号灯の 見分けやすさ	昼	図 6(a)	0.59
	Y_{day}	図 6(b)	0.02

表6. 各指標に対する一致率

指標	一致率(正解画像対数/画像対数)		
	(a)6名-0名	(b)5名-1名	(c)4名-2名
X_{day}	67% (28/42)	71% (34/48)	57% (40/71)
X_{night}	100% (49/49)	80% (49/62)	49% (28/57)
Y_{day}	95% (90/95)	80% (33/41)	56% (20/36)

4.1.1 従来手法

提案手法の有効性を検証するため、従来手法との比較を行った。従来手法では、色情報を用いずに、グレースケール情報を基に視認性指標を計算した[14]。

昼間の見つけやすさについては、色特徴を考慮せずに、テクスチャ特徴のみを指標として用いた場合を従来手法として用いた。テクスチャ特徴はFFTを用いて抽出した。FFTを適用するために、信号機に隣接する背景領域を8つの矩形領域にわけ、信号機領域と背景領域のパワースペクトラムの差の絶対値の総和を指標とした。

夜間の見つけやすさについては、誘目度を考慮せずにグレア源の等価光幕輝度のみを指標とした場合を従来手法として用いた。

4.2 評価実験

提案手法により計算した交通信号機の視認性指標と、運転者から見た信号機の視認性が一致しているかどうかを確認するため、被験者実験を行った。その結果を用いて、視認性指標と人間の知覚の一致率を計算した。

視認性指標の計算に用いた画像は、顕著な色飽和を避けるために、絞りの値を7.1と大きな値で撮影した。そのため、特に夜間に撮影された画像は画像全体が暗く、運転者から見た視界状況とは大きく異なる(図7(a))。そこで、被験者実験のために、データ収集の際に同時にオートモードで撮影した画像を、肉眼で見たときと同程度の画像として被験者提示用に用意した(図7(b))。

4.2.1 被験者実験による正解の作成

理想的には、被験者を実際に現場に連れていき視認性を評価してもらうことが考えられるが、実験の都合上、プリンタ(Canon PIXUS iP4300)でカラー印刷した画像を用いて評価を行った。指標毎に画像20枚を用意し、20枚の画像の全組合せ ${}_{20}C_2=190$ 対をランダムに被験者に提示した。そして、より信号機を見分けやすい、もしくは、より点灯中の信号灯を見分けやすい画像を選択させた。各画像対を6名の被験者が評価し、被験者の回答の多数決をとった。その結果と提案手法により計算された指標による結果が等しければ正解とした。

4.2.2 視認性指標と人間の知覚の一致率

被験者実験により作成された正解をもとに、提案手法により計算された各指標と、人間の知覚との一致率を計算した。6名の被験者の回答の分かれ方毎に一致率を計算し、その結果を表6に示す。1つの画像対について、6名の被験者の回答の分かれ方は、(a)6名-0名(b)5名-1名(c)4名-2名(d)3名-3名の4通りあるが、(d)については正解を判定できないため、一致率は計算しなかった。

また、回答の分かれ方が(a)の場合の、提案手法と従来手法による一致率の比較を表7に示す。

4.3 考察

夜間の見つけやすさ指標 X_{night} と昼間の見分けやすさ指標 Y_{day} については、被験者6名全員が同一の画像を回答した画像対において、それぞれ100%、95%の一致率で、良好に信号機の視認性を定量化できた。

(b)5名-1名、(c)4名-2名に回答が分かれた画像対については、被験者によって回答が異なることから、個人の視覚特性が影響していることを考慮しなければならない。そのため、画像特徴のみを用いた提案手法では、正確な認識は困難であると考えられ、実験結果からもこのことが確認された。

昼間の見つけやすさ指標 X_{day} の一致率が他の指標に比べて低かった。提案手法では、信号機領域と背景領



(a) 指標計算用画像 (b) 被験者提示用画像

図7. 実験に用いた夜間の画像

表7. 提案手法と従来手法による一致率の比較

指標		一致率 (正解画像対数/画像対数)	
		提案手法	従来手法
信号機の 見つけやすさ	昼	67% (28/42)	58% (24/42)
	夜	100% (49/49)	90% (44/49)



図8. (a) 筐体領域に注目した方が見つけやすい場合と
(b) 信号灯領域に注目した方が見つけやすい場合

域の間の特徴量の差を計算し、被験者実験においても信号機領域を見つけやすい画像を選択させた。しかし、画像によっては、被験者が無意識のうちに、信号機領域ではなく、信号灯領域に注目した可能性が考えられる。例えば、図8(a)の場合、背景領域と筐体領域の色の相違度が高く、筐体領域を見つけやすいと感じる。しかし、逆に筐体領域と背景領域の色が類似している場合、被験者は信号機領域と背景領域ではなく、信号灯領域と背景領域の色の対比に注目しやすいと考えられる(図8(b))。そのため、筐体領域と背景領域の色の類似度によって、注目領域を変化させる必要がある。

また、 X_{day} 、 X_{night} とともに、従来手法よりも提案手法の方が一致率は高く、色情報を考慮することが、視認性の定量化に有効であることが確認できた。

5. おわりに

本稿では、画像処理により、運転者から見た交通信号機の視認性を定量化する手法を提案した。交通信号機の視認性を見つけやすさと見分けやすさの2つの尺度に分け、それぞれ人間の視覚特性に基づいて、画像から視認性に影響を及ぼす特徴を抽出し、抽出された特徴量をもとに視認性指標を計算した。提案手法の有効性を確かめるために被験者実験を行い、提案した視認性指標が人間の知覚と一致しているかどうかを調べた。その結果、夜間の見つけやすさ指標 X_{night} は一致率100%、昼間の見分けやすさ指標 Y_{day} は一致率95%という結果が得られ、概ね良好に運転者から見た交通信号機の視認性を定量化できていることを確認した。

今後は、筐体領域と背景領域の色の類似度によって、注目領域を変化させるなどの昼間の見つけやすさに関する指標 X_{day} の改良や、視認性指標に運転者の個人特性を組み込みことが課題である。また、実際のシステムにむけて、交通信号機の位置検出手法と組み合わせた処理の実装や、最終的に情報提供を行う閾値の決定などが課題である。

謝辞

日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に感謝する。被験者実験に関してご助言を頂いた名古屋大学教授三輪和久先生に深謝する。本研究の一部は、科学研究費補助金による。本研究では、画像処理に MIST ライブラリを使用した。

(<http://mist.suenaga.m.is.nagoya-u.ac.jp/>)

文献

- [1] TOYOTA クラウン マジェスタ, レーンキーピングアシスト, <http://toyota.jp/crownmajesta/dynamism/body/index.html>
- [2] 島ら, “運転支援システム用フュージョンセンサの開発,” 富士通テン技報, Vol.19, No.1, pp.31-39, July 2001
- [3] 北村ら, “自動車運転時の聴覚情報への対応課題がドライバーに与える影響 - 生理的・行動的变化から -,” IATSS Review, Vol.30, No.3, Sep. 2005
- [4] L. Fletcher, et al., “Correlating Driver Gaze with the Road Scene for Driver Assistance,” Robotics and Autonomous Systems, Vol.52, Issue 1, pp.71-84, July 2005
- [5] 田久保宣晃, “交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察,” IATSS Review, Vol.30, No.3, Sep. 2005
- [6] F. Lindner, et al., “Robust Recognition of Traffic Signals,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2004, pp.49-53, June 2004
- [7] 日本色彩学会, “色彩科学ハンドブック第2版,” 東京大学出版会, 1998
- [8] 照明学会, “照明ハンドブック第2版,” オーム社, 2003
- [9] C. Palm, “Color Texture Classification by Integrative Co-occurrence Matrices,” Pattern Recognition, Vol.37, Issue 5, pp.965-976, May 2004
- [10] Y. Deng, et al., “Color Image Segmentation,” Proc. IEEE Computer vision and Pattern Recognition 1999, Vol.2, pp.446-451, June 1999
- [11] 猪平ら, “3次元ヒストグラムによるカラー量子化とカラー画像の領域分割,” 信学技報, ITS2003-80, Jan. 2004
- [12] 神作博, “色光の誘目性について,” 照学誌, Vol.51, pp.684-690, 1967
- [13] M. Wada, et al., “Road-to-vehicle Communication Using LED Traffic Light,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005, pp.601-606, June 2005
- [14] F. Kimura, et al., “Measurement of Visibility Conditions toward Smart Driver Assistance for Traffic Signals,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2007, pp.636-641, June 2007