

ユビキタス・センサ・ネットワーク時代に向けた信号制御方式について*

Traffic Signal Control Schemes towards the Ubiquitous Sensor Network Age*

麻生敏正**・長谷川孝明***

By Toshimasa ASO**・Takaaki HASEGAWA***

1. まえがき

交差点における安全性と輸送効率の向上、周辺環境の改善やバリアフリー化のため、様々な信号制御方式の研究が行われている^{1) -19)}。交通状況に適応的な制御を行うためには、入力情報の質と制御アルゴリズムが重要である。当初利用可能な入力情報は、定点における車両の通過台数であった。この制約条件では、サイクル、スプリット、オフセットの最適化を経ることにより現示を最適化する制御アルゴリズムに高い合理性があった。既に広く敷設されているセンサからの入力情報を用い、サイクル、スプリット、オフセットの最適化を経る制御方式の研究が現在、主として行われている^{1) -13)}。

近年、様々な位置特定や通信を含むITSプラットフォームに関する研究が盛んに行われ、これらのいくつかでは実現可能性が示されている^{20) -25)}。この展望に基づき、トラヒックカウンタのような、現在広く敷設されているセンサに限定せず、今後設置される可能性があるセンサなど(利用者がGPSなどにより得た自位置情報を通信で伝送する形態も含む)からの情報を入力とする信号制御の研究が行われている。たとえば5)では、高精度に直接測定した遅れ時間に基づき、サイクル、スプリット、オフセットの最適化を逐次行う制御方式が提案されている。一方、2000年にこれらの伝統的なパラメータを用いない制御アルゴリズムを持つ、高度デマンド信号制御方式(Advanced Demand Signals Scheme; ADS方式)が提案され、現在までに様々な評価や改良が行われている^{14) -19)}。ADS方式は、瞬時瞬時の個々の車両の位置情報に基づき、現示を直接制御する(ただし、17)以降では重要性に鑑みて歩行者も考慮している)。

信号制御方式は、様々な分類が可能であるが、図-1に

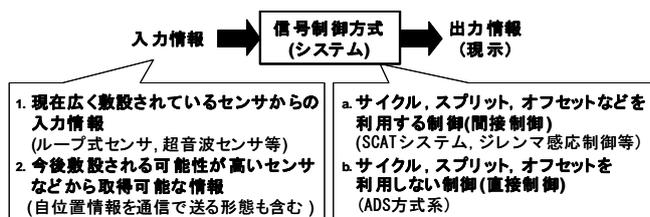


図-1 信号制御方式のシステム図

示すように、入力情報の観点から2種に分類され、さらに制御アルゴリズムの観点から2種に分けることができる。入力情報の観点からの分類では、現在広く敷設されているセンサからの入力情報を前提とした制御と、必ずしもこれらのセンサに限定されず、将来実現され得るセンサなどからの入力情報を前提とした制御に分けられる。前者の入力を前提とすることは、現時点の交差点で実現する場合において重要である。一方、制御アルゴリズムの観点からの分類では、サイクル、スプリット、オフセットを用い、これらの最適化を経る制御と、これらを用いず位置情報に基づいた直接制御に分けられる。これらのパラメータの最適化を経る制御は、パラメータの性質上、統計量に基づく制御を行うことになり、また現示もこれらのパラメータより間接的に制御される。これに対し、伝統的なパラメータを用いないADS方式系では、瞬時瞬時の個々の位置情報に基づいて加重合計した2種のデマンド評価値を比較し、現示を直接制御する。

将来実現され得る交差点における信号制御の検討や科学的側面から信号制御の性能限界の検討を行う場合には、現行センサ利用による拘束や、サイクル、スプリット、オフセットのパラメータ利用による拘束をはずし、議論することが重要である。すなわち、入力情報や制御アルゴリズムの観点から信号制御を包括的に議論し、その実用化を目指した研究基本戦略の提示は重要である。

そこで本稿では、入力情報や制御アルゴリズムの観点から、信号制御を包括的に整理した上、サイクル、スプリット、オフセットを用いず、個々の利用者の位置情報に基づいて現示を直接制御する方式と伝統的な制御方式の具体的な比較結果を提示し、さらにこの直接制御する方式の具体例であるADS方式系の実用化を目指した研究基本戦略を提示する。

*キーワード: 入力情報, 制御パラダイム, 高度デマンド信号制御方式

**正員、埼玉大学

(埼玉県さいたま市桜区下大久保255

TEL:048-858-3480、

E-mail:tosimasa@nslab.ees.saitama-u.ac.jp)

***非会員、埼玉大学

2. 信号制御の入力情報の質と制御パラダイム

(1) 入力情報の質的变化

入力情報の取得方法には、交差点付近に設置したセンサから車両や歩行者の位置情報をシステムが直接得る方法と、車両や歩行者がGPSなどにより得た自位置情報を通信で伝送することにより、システムが位置情報を間接取得する方法がある。後者の間接取得する方法では、入力情報の質は利用者の自位置特定手法に依存する(たとえば、M-CubITSは車両の位置特定誤差がほぼ数センチであることを明らかにしている²²⁾)。

様々な位置特定や通信を含むITSプラットフォームに関する研究^{20) -25)}により、入力情報の高品質化と多様化が進んでいる。初期に交差点に導入されたセンサでは、ある測定点(1つまたは複数のセンサが敷設)において、通過した車両の台数のみがイベントドリブ的に取得可能であった。その後、測定点を通過した車両の瞬時速度なども取得できるようになった。さらに近年では、交差点において、空間的にも時間的にも連続に、個々の車両や個々の歩行者の位置情報や速度情報を取得することが十分現実的になりつつある。

(2) 入力情報の質的变化がもたらす制御パラダイムへの影響

上述した入力情報の質的向上は、伝統的な信号制御方式の安全や効率に関する性能改善や制御対象の多様化を生み出す。たとえば、従来のジレンマ感応制御⁴⁾では停止線の上流地点のセンサで得た計測速度が下流への走行に伴って変化しないことを仮定し、制御していた。そのため、この仮定が成立しない場合、うまく機能しないという問題点があった。しかし、8)では画像センサを用いることで、時々刻々の車両の走行位置と速度を直接計測することが可能になり、これにより上記の課題を解決している。さらに画像センサで交通弱者を検出することにより、バリアフリーに対応する信号制御^{たとえば12)}が可能になる。

しかしながら、この入力情報の質的向上は、サイクルやスプリット、オフセットの最適化経る制御方式の性能向上だけでなく、制御パラダイムそのものへも影響を与える。つまり、個々の車両や歩行者の瞬時瞬時の位置情報が利用可能になった場合、サイクルやスプリット、オフセットの最適化経る伝統的な制御パラダイムとは全く異なる制御パラダイムが実現可能になる。これは瞬時瞬時の個々の利用者の位置に基づき、現示を直接決定する制御である。この制御は混雑時と閑散時ともに効果を発揮する。これは、伝統的な制御に比べ、より高い現示出力の自由度により、車両や歩行者の個々の到着に合わせた現示出力が可能なためである。ただし、利用者に大

きな混乱を生じさせないように、留意する必要がある。

サイクル、スプリット、オフセットを用いる伝統的な制御は、現示の周期や時間配分に着目した制御である。そのため、ある時間内の通過車両台数といった低品質の入力情報である場合において、合理的かつ適応的に現示を制御することが可能である。しかし、この伝統的なパラメータは、入力情報の質が低い場合において利便性は高いが、このパラメータを用いることによる制約から最適な現示が出力できない場合(たとえば、閑散時)があることは自明である。ジレンマ感応制御方式もまた、この制御の一例である。これは主として伝統的なパラメータに基づき制御し、青打ち切りのみ、ある特定の車両の位置情報と速度に基づいた制御を行うためである。

これに対し、位置情報に基づき現示を直接決定する制御は、瞬時瞬時の個々の利用者位置に着目し、これらの位置情報に基づき、現示を直接制御する。このため、閑散時においては瞬時瞬時の個々の利用者位置に基づいた制御、混雑時は結果として統計量に基づいた制御を行うことになる。

以上より、サイクル、スプリット、オフセットの最適化を経る制御と位置情報に基づいた直接制御の違いは、前者は統計量データに基づき、3種のパラメータを最適化し、この最適化したパラメータと時刻より、出力する現示を間接制御するのに対し、後者は個々の位置情報に基づき現示を直接制御するという点にある。さらに、サイクル、スプリット、オフセットというパラメータの最適化を経る制御は、これらを用いるための自由度の低下あるいは制約が伴うのに対し、位置情報に基づいた直接制御はより高い自由度の中での最適化という意味がある。

以降、サイクル、スプリット、オフセットを用いず、位置情報に基づき現示を直接制御する方式の具体例であるADS方式系について述べていく。

3. ADS方式^{4) -16)}

(1) 制御アルゴリズム^{14) -16)}

ADS方式は利用者が信号機を制御する。この方式は、瞬時瞬時の個々の位置情報に基づいて加重合計した2種のデマンド評価値(主方向の青を希望するデマンド評価値と従方向の青を希望するデマンド評価値)を算出・比較することで、現示を直接制御する。たとえば主方向が青の場合、主方向の青を希望するデマンド評価値が大きい間は主方向青を表示し続け、小さくなると黄、全赤表示後、従方向青を表示する。このため、閑散時においては瞬時瞬時の個々の車両位置に基づいた制御、混雑時は結果として統計量に基づいた制御となる。

以降、1次元のネットワークを例に挙げ、上記の2種のデマンド評価値の算出方法について述べる。交差点*i*

の主方向の青を希望するデマンド評価値と従方向の青信号を希望するデマンド評価値はそれぞれ、

$$f_i^{(m)} = c_i^{(m)} \sum_{j^{(m)}} f_{i-1,j}^{veh} + \sum_{j^{(m)}} f_{i,j}^{veh} + c_i^{(m)} \sum_{j^{(m)}} f_{i+1,j}^{veh} \quad (1),$$

$$f_i^{(c)} = c_i^{(c)} \sum_{j^{(c)}} f_{i-1,j}^{veh} + \sum_{j^{(c)}} f_{i,j}^{veh} + c_i^{(c)} \sum_{j^{(c)}} f_{i+1,j}^{veh} \quad (2)$$

により算出する。 f_{ij}^{veh} は交差点 i に対する車両 j のデマンド評価値である。 $j^{(m)}$ と $j^{(c)}$ はそれぞれ主道路と従道路に在る車両、 $c_i^{(m)}$ と $c_i^{(c)}$ は連携係数である。 連携係数は

$$c_i^{(m)} = \begin{cases} c, & \text{交差点}i\text{の主方向の信号が青} \\ 0, & \text{交差点}i\text{の主方向の信号が青でない} \end{cases} \quad (3),$$

$$c_i^{(c)} = \begin{cases} c, & \text{交差点}i\text{の従方向の信号が青} \\ 0, & \text{交差点}i\text{の従方向の信号が青でない} \end{cases} \quad (4)$$

である。これは隣接交差点との連携をとるためのパラメータであり、この値を大きくすることは隣接信号との連携を強めることになる。交差点 i の入力情報取得範囲内にある車両 j のデマンド評価値は

$$f_{i,j}^{veh} = \begin{cases} 1/(d_{i,j}^{stop} + D_i^{stop})^n, & (\text{停止線を過ぎていない場合}) \\ 1/(D_i^{stop})^n, & (\text{停止線を過ぎている場合}) \end{cases} \quad (5)$$

である。ただし、 $d_{i,j}^{stop}$ は交差点 i の停止線までの距離 [m] であり、 D_i^{stop} は停止線から交差点の角までの距離に 1 車線幅員分の距離を加えた距離 [m] である。また n はデマンド関数のべき乗部であり、デマンド評価値の重みを車両の位置により変えるパラメータである。デマンド関数のべき乗部が 0 より大きい場合、交差点に近い車両ほどデマンド評価値が大きくなる。

さらに ADS 方式には、右折専用車線上に右折希望車両が停止線から 50m 以内に存在する場合に、右折矢を固定時間出力し、その他の場合打ち切るまたはスキップするといった右折矢制御も導入されている。また ADS 方式は 1 秒間隔で現示情報を出力するため、単純にデマンド評価値だけによる制御では、交通状況によっては頻繁に通行権が変わり、交通流が滞る可能性がある。そこで最小青時間によって、これを避ける。

ADS 方式は、閑散時のような交通量が少ない場合において特に効果が大きい。また、通信を用いた他の信号制御方式^{たとえ6)}と同様に公共車両や緊急車両に対して適応的に通行権を与えることが可能である。さらに ADS 方式を用いることで夜間などの黄・赤の車両用の点滅信号の必要がなくなり、運転者が単純に信号に従うだけの表示にすることが可能なため、出会い頭の衝突が発生しにくくなることが期待される。

(2) 性能評価¹⁶⁾

ADS 方式と系統制御方式の性能比較結果を示す。まず、両制御方式の各種パラメータの値を十分に細かくとった上、各交通状況において、パラメータの組み合わせを総当たりで評価し、最適パラメータを算出している。ここで

は、評価対象エリアに車両が進入・通過するまでに運転者が不快と感じるような低速走行時間 (2.0m/s 以下で走行する時間) の全車平均を平均車両アイドリング時間と定義し、評価指標として用いている。次に求めた最適 (平均アイドリング時間が最小となる) パラメータを用いて ADS 方式と系統制御方式の性能比較を行っている。

評価対象の道路は路線上に連続する 11 交差点である。主道路と従道路は直行しており、交差点間の距離は等間隔である。右左折希望確率は、主道路ではそれぞれ 10%、従道路ではそれぞれ 40% とし、直進車両の車線変更選択率は 80 % としている。26) に基づき、ADS 方式と系統制御方式ともに黄時間 4s、全赤時間 2s である。

第一に、主方向と従方向の 1 車線あたりの平均車頭間隔の比を 1 対 2.5 で固定し、基本性能特性の検討を行っている。その結果、閑散時ほど、また車線数が少ないほど ADS 方式の効果が大きくなることを明らかにしている。ただし、主道路両側 6 車線、従道路両側 4 車線または主道路両側 7 車線、従道路両側 5 車線 (右折専用車線あり) では、平均車頭間隔が主方向 12s、従方向 30s の付近で、ADS 方式の性能が劣化し始め、系統制御方式に比べ、平均車両アイドリング時間が大きくなる。

ADS 方式は流入方向ごとのデマンド評価値を用いて、現示を決定しているため、従方向の交通量が主方向と比べて大幅に少ない交通状況では、従道路の車両が長時間待たされる可能性がある。そこで第二に、主方向と従方向の交通量が大きく偏る交通状況 (主道路両側 6 車線、従道路両側 4 車線) かつ 1 車線あたりの平均車頭間隔が主方向 10s、従方向 100s) における車両アイドリング時間の分布を調査している (図-2)。この結果より ADS 方式の有用性は変わらないことがわかる。これは交差点に近い車両のデマンド評価値が大きいためである。

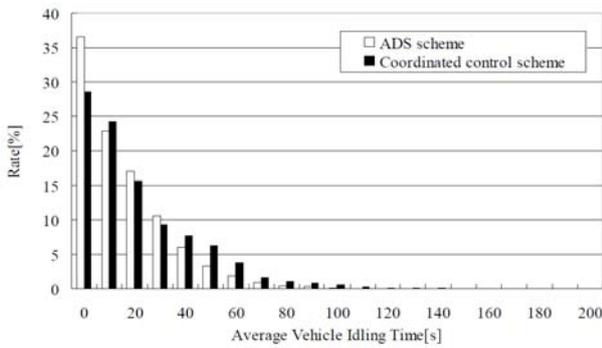
第三に、ADS 方式の隣接信号間の青信号開始タイミングの検討を行っている (図-3)。その結果、主道路の上下線で交通量の偏りがある場合、ADS 方式は車両を媒体とし、自己組織的に隣接信号間の青信号開始タイミングのずれが生じることを確認している。

そしてこれ以外にも、通信機器に通信による各車両の位置情報取得を仮定した際の通信機器普及率特性の検討も行っている。

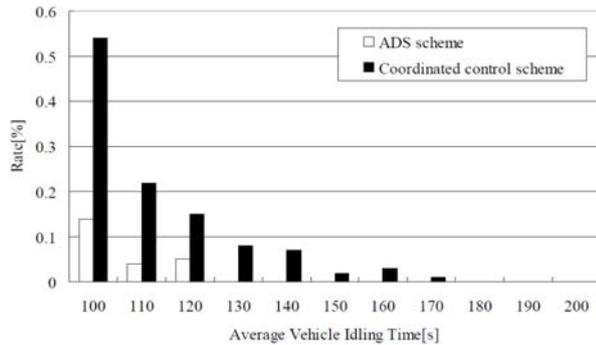
4. ADS-II 方式¹⁷⁾

(1) 制御アルゴリズム

ADS-II 方式では利用者のデマンドを車線ごとに分けることで、ADS 方式と比べ、より詳細に利用者のデマンドを現示に反映するよう、制御アルゴリズムが改良されている。具体的には、現示の維持を希望するものと変化を希望するものの 2 種に分類したデマンドに基づき、



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-2 車両アイドリング時間分布

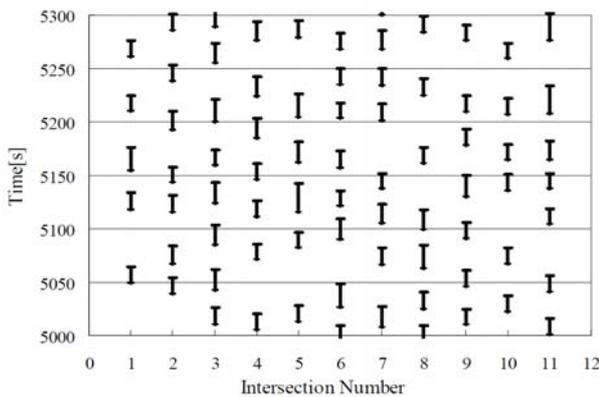


図-3 ADS方式におけるオフセット現象

現示を制御する。これは実際の交通環境を考えた場合、青信号側のすべての車両が青信号を希望するとは限らないためである。筆者らの経験に基づいて推測した場合、たとえば、右折希望車両は、横断歩行者の交通量や対向車線の車両交通量が多く、右折が困難な場合、早く青信号が終わり、右折が快適にできる右折矢表示を希望し、また左折希望車両は歩行者交通が多く、左折が困難な場合、歩行者赤・車両青表示を希望するため、前述したように、デマンドを現示の維持と変化に分類している。

さらに ADS-II 方式は、個々の車両と歩行者の情報を入力とし、ADS-II 方式では車両と歩行者に対して統一的なデマンド評価式を用いて歩行者のデマンドも現示に反映している。歩行者のデマンド評価値は、停止線で停止している車両のデマンド評価値に重み付けした値とし

ている。ADS-II 方式では、この歩行者の考慮以外に、アイドリング時間に着目することにより、ADS 方式に比べて、より全体最適的な右折矢制御や、長アイドリング時間利用者の優先制御も導入している。

(2) 性能評価

「待ち時間による損失は、車両と歩行者ともに等しい」という考えに基づき、車両の搭乗者と歩行者を含めた、1 交差点を抜けるまでにかかる一人当たりの平均アイドリング時間が小さい制御ほど優れた制御としている。これにより車両と歩行者の一元的な評価が可能となるため、この一人当たりの平均アイドリング時間を主たる評価指標とする。ただし、歩行者のアイドリング時間は、1 交差点を横断するまでにかかる時間である。

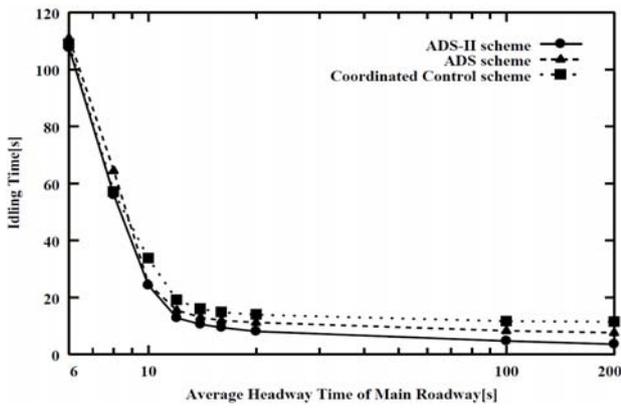
ここでも各制御方式の最適パラメータの検討を行った上、求めた最適パラメータを用いて ADS-II 方式と ADS 方式、系統制御方式の性能比較を行っている。

交差点数 11、リンク長 300m の道路環境において、主方向の 1 車線あたりの平均車頭間隔と従方向の 1 車線あたりの平均車頭間隔、1 箇所あたりの平均歩行者発生間隔の比を 1 対 2 対 20 (実測した国道 463 号線の 1 交差点のある時間の交通量比) で固定した場合の一人当たりの平均アイドリング時間の比較結果を図-4 に示す。

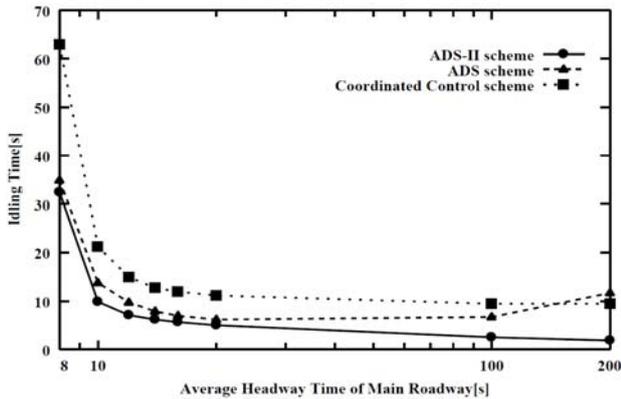
図-4 より ADS-II 方式は ADS 方式と比べ、すべての交通状況において性能が向上することがわかる。とくに多車線道路の混雑時に系統制御方式よりも性能が高いことは従来型 ADS 方式と大きく異なる点である。これらの結果は、また、車線数の多い交差点よりも少ない交差点ほど、ADS-II 方式は系統制御方式に比べ、大きな効果を出すことを示している。一般に車線数が少ない交差点ほど、車両が交差点にたまりやすく、現在の交通状況に適応的な現示を出力する必要がある。ADS-II 方式は瞬時瞬時の個々の車両や歩行者の位置情報を入力として用いており、瞬時性の高い制御を行うことができるため、車線数の少ない交差点ほど有用である。

さらにどちらの道路環境においても、主道路の平均車頭間隔が 200s の場合、系統制御方式に比べ、一人当たりの平均アイドリング時間を約 70 %削減し、ADS-II 方式は閑散時ほど大きな効果を示している。またどちらの道路環境においても、平均歩行者アイドリング時間は系統制御方式よりも削減される。ゆえに ADS-II 方式を用いることで、閑散時に長時間歩行者が待たされることが減り、信号無視歩行者数の減少が期待できる。

最後に二次元的な道路ネットワークへの適用可能性について検討を行うために、主道路 3、従道路 5、リンク長 300m の道路ネットワーク上で、基本的な面制御方式と ADS-II 方式の性能比較を同様に行っている。その結果より、評価する交差点のネットワークの違いによっ



(a) 主道路両側 7 車線，従道路両側 5 車線 (右折専用車線あり)



(b) 主道路両側 3 車線，従道路両側 3 車線 (右折専用車線あり)

図-4 1次元道路ネットワークでの比較

て結果の絶対値は変化するが、ADS-II方式の相対的な結果は同じであることを明らかにしている。

5. 実用化にむけた研究基本戦略

最後に、ADS方式系の研究開発を行う上で重要である、実用化を目指した3つの研究基本戦略について述べる。

ADS方式の本質は、個々の利用者の位置情報に基づき現示を直接制御することであり、位置情報の取得方法は特に限定していない。したがって、実用化を目指すうえで必要なことは、連携係数やデマンド関数のべき乗部といったパラメータ決定の全自動化や実道における性能評価、既存センサからの入力を用いた場合の検討がある。

第一のシステムパラメータの全自動化は、19)で行われており、コストに基づき、これらを全自動で決定するFA-ADS-II方式が提案・評価されている。2つの交差点を対象とした評価より、静的な交通状況(ある特徴的な交通状況が長時間続く状況)と動的な交通状況(ある時間帯のみで交通量が変動する状況)においてほぼ性能劣化せずにシステムパラメータの全自動化が達成することが明らかにされている。

第二の実道における性能評価では、463号線の一部区間(約5キロ)を模擬したシミュレータを構築した上、ADS方式系と実際に運用されている信号制御方式との性

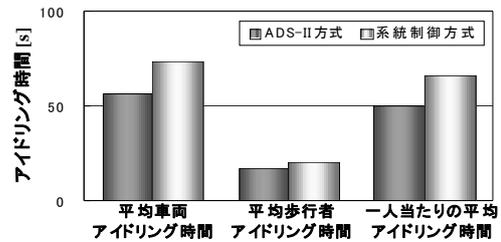


図-5 国道463号線のAM7:00における比較

能比較(たとえば図-5)を行い、ADS方式系の有用性を提示している。

第三の、既存センサからの入力を用いた場合の検討では、現時点でのセンサの整備状況を鑑みて実道への実現を考える場合に、各車両や各歩行者の位置情報は画像センサにより得ることが現実的であるため、画像センサからの入力情報を用いた場合の性能への影響と実用性に関する検討が行われている¹⁸⁾。この文献では、画像センサを用いた場合の誤差や検出もれを考慮したシミュレータの構築を行い、このシミュレータを用いて評価を行い、カメラの設置高さを6mとすると実用上十分であることを明らかにしている。

6. むすび

本稿では、入力情報や制御アルゴリズムの観点から、信号制御を包括的に議論した上、個々の位置情報に基づいて現示を直接制御する方式であるADS方式系の制御アルゴリズムや性能比較結果の提示と、その実用化に向けた研究基本戦略を提示した。

第一に、信号制御が取得可能な入力情報について述べ、次に制御アルゴリズムの観点から、サイクル、スプリット、オフセットの最適化を経る制御と、これらを用いず位置情報に基づいて直接現示を決定する制御の定性的な性質について述べた。

第二に、位置情報に基づいて現示を直接決定する制御の具体例である、ADS方式やADS-II方式の制御アルゴリズムについて述べた上、性能評価結果を示し、ADS方式系の有用性を定量的に提示した。

第三にADS方式系の実用化にむけた基本戦略である、システムパラメータ決定の全自動化や実道における性能評価、既存センサからの入力を用いた場合の検討についての知見を提示した。

以上より、信号制御に関する整理とその具体例、実用化を目指したADS方式系の研究基本戦略を提示することで、ユビキタス・センサ・ネットワーク時代に向けた信号制御について、著者らが重要と考えている事項を提示した。

今後の課題としては、人間の多様性を考慮した評価指標の検討や、環境まで含めた様々な評価指標を用いた、

より詳細な性能評価, ニーズを考慮した評価関数の検討がある. またランニングコストと設置コストを含めた社会的コストに関する考察として, ラウンドアバウトを含めた詳細な性能比較も重要である.

参考文献

- 1) 星埜和, 越正毅, 松永典昭, 有藺卓, 木戸伴雄 : 「東京都心部広域信号制御システムの概要」 交通工学, vol. 5, no. 3, pp3-30, 1970.
- 2) 河上省吾, 荻野弘, 青島縮次郎, 丹羽尚樹 : 「騒音防止のための夜間長距離信号制御が交通流に及ぼす影響について」 交通工学, vol. 14, no. 3, pp3-13, 1979.
- 3) A. G. Sims and K. W. Dobinson, "The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System Philosophy and Benefits," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 29, no. 2, pp130-137, 1980.
- 4) 斎藤威 : 「ジレンマ・ゾーンの回避を意図した信号制御方式とその効果」 交通工学, vol. 29, no. 6, pp11-22, 1994.
- 5) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 尾崎晴男, 安井一彦, 中村英樹, 大口敬, 吉井稔雄, 堀口良太, 小根山裕之 : 「ITSセンシング技術を活用した交通信号制御アルゴリズム」 第25回土木計画学研究・講演集, 2002.
- 6) 新倉聡 : 「PTPS における信号制御手法について」 交通工学, vol. 38, no. 2, pp30-40, 2003.
- 7) 浅野美帆, 堀口良太, 桑原雅夫 : 「交通シミュレーションを利用した信号制御アルゴリズム評価のための仮想社会実験」 交通工学, vol. 39, no. 2, pp39-45, 2004.
- 8) 斎藤威, 板倉誠司, 高橋義典, 北川朝靖 : 「空間型感知器を用いたジレンマ感応制御方式の開発」 交通工学, vol. 39, no. 3, pp63-72, 2004.
- 9) 椿孝一, 渡邊和彦, 浅羽正和 : 「地方都市でのMODE RATO-EII 信号制御方式の導入による効果」 第4回 ITS シンポジウムプロシーディングス, pp. 133-140, 2005.
- 10) T. H. Heung, T. K. Ho, and Y. F. Fung : 「Coordinated Road-Junction Traffic Control by Dynamic Programming」 IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 6, no. 3, pp341-350, 2005.
- 11) 織田利彦, 音喜多亨, 新倉聡 : 「自動車交通からの二酸化炭素排出量低減に向けたオンライン交通信号制御」 電気学会論文誌D, vol. 126, no. 11, pp1522-1530, 2006.
- 12) 岩崎洋一郎 : 「画像処理による交通弱者追跡機能を有する歩行者交通信号制御」 第20回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 61-64, 2000.
- 13) 岩崎茂久, 風間洋, 安井一彦, 新倉聡 : 「歩行者感応制御の高度化実証実験」 第26回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 89-92, 2006.
- 14) 加藤泰典, 長谷川孝明 : 「車両により制御される交通信号—交通信号のパラダイムの転換—」 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2000-33, pp. 67-71, 2000.
- 15) 今井洋介, 加藤泰典, 長谷川孝明 : 「高度デマンド信号制御方式」 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-A No. 1, pp. 62-70, 2005.
- 16) 麻生敏正, 長谷川孝明 : 「拡張したシミュレータによる高度デマンド信号制御方式の性能評価」 電子情報通信学会論文誌, vol. J91-A, no. 1, pp. 33-43, 2008.
- 17) 麻生敏正, 長谷川孝明 : 「高度デマンド信号制御II方式」 電子情報通信学会論文誌, vol. J92-A, no. 6, pp. 419-433, 2009.
- 18) 高野勇介, 麻生敏正, 長谷川孝明 : 「高度デマンド信号制御II方式における画像センサの影響について」 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2008-66, pp. 183-188, 2009.
- 19) 麻生敏正, 長谷川孝明 : 「全自動高度デマンド信号制御II方式」 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-A, No. 8, pp. -, 2010. (印刷待ち).
- 20) 森岡仁志, 真野 浩, 大田昌孝, 寺岡文男 : 「MIS プロトコルとPDMA による高速ハンドオーバー」 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2004-365, pp. 243-248, 2005.
- 21) T. Taleb, E. Sakhaee, A. Jamalipour, K. Hashimoto, N. Kato, and Y. Nemoto : 「A Stable Routing Protocol to support ITS Services in VANET Networks」 IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 56, no. 6, pp3337-3347, 2007.
- 22) 金帝演, 長谷川孝明 : 「M-CubITSを用いた車両測位実験」 電子情報通信学会論文誌, vol. 89-A, no. 11, pp. 993-1003, 2006.
- 23) 上條俊介, 松下康之, 池内克史, 坂内正夫 : 「時空間Markov Random Filed モデルによる隠れにロバスタな車両トラッキング」 電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-D-II no. 12, pp2597-2609, 2000.
- 24) 萩原祥行, 有間康二, 菅原尚洋, 上条俊介 : 「時空間MRF技術の歩行者センサへの応用」 第7回ITS シンポジウムプロシーディングス, pp. 1-6, 2008.
- 25) 長谷川孝明 : 「ITSプラットフォーム“EUPITS”—実現へのアプローチ—」 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2003-8, pp. 41-47, 2003.
- 26) 交通工学研究会 : 「改訂交通信号の手引」 丸善, 2006.