

高速道路の合流支援情報提供DAY2システムに 活用する車両検知センサの精度確認

中田 諒¹・花守 輝明²・藤村 亮太²・中川 敏正³・関谷 浩孝⁴

¹非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室 研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: nakata-r92sc@mlit.go.jp

²非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室 交流研究員

³非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室 主任研究官

⁴正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室長

高速道路での自動運転については、高速道路本線への合流が大きな課題とされている。特に都市高速道路では、加速車線が短く、かつ連結路から本線への見通しが悪い箇所が存在する。このような状況において、安全で円滑な自動運転を実現するためには、道路側からの支援が不可欠となる。

そこで、国土技術政策総合研究所では、「合流支援情報提供システム」を官民共同研究により技術検証している。このうち、DAY2システムは、本線の一定区間を0.1秒間隔等で複数回検知し、連結路を走行する自動運転車に連続的に情報提供するものである。当該システムの基幹的な要素技術である車両検知センサの精度を確認するために、試験走路及び実道で実証実験を行った。その結果、最も計測精度の良いセンサでは、速度の計測誤差（絶対値の平均値）が約0.25km/hであること等を確認した。

Key Words: merging support system on expressway, vehicle detection sensor, accuracy confirmation

1. はじめに

高速道路での自動運転については、高速道路本線への合流が大きな課題とされている。特に都市高速道路では、加速車線が短く、かつ連結路から本線への見通しが悪い箇所が存在する。このような状況において、安全で円滑な自動運転を実現するためには、道路側からの支援が不可欠となる。

そこで、車両検知センサが合流部より上流の本線の交通状況（車両の速度、車長等）を検知し、連結路を走行する自動運転車に情報提供する「合流支援情報提供システム」が検討されている。これにより、自動運転車は、本線の適切な車間の有無を踏まえて合流可否を判断し、

連結路で事前に速度調整を行い、自動合流を行うことが可能となる。

国土技術政策総合研究所では、当該システムの基幹的な要素技術である車両検知センサについて、官民共同研究により、計測精度を確認するための実証実験を行った。なお、当該システムは「DAY1システム¹⁾」と「DAY2システム」に大別される。本稿では本線の一定区間を0.1秒間隔等で複数回検知し、連結路の自動運転車に連続的に情報提供するDAY2システム（図-1）に活用する車両検知センサの精度確認の結果を報告する。

2. 車両検知センサ（DAY2）の精度確認実験

(1) 実証実験の方法

精度確認のための実証実験は、試験走路の管理された交通流でセンサの基本的な計測精度を確認した後、実道で多様な交通流に対する計測精度を確認した。

a) 試験走路

国土技術政策総合研究所の試験走路の路肩部に足場

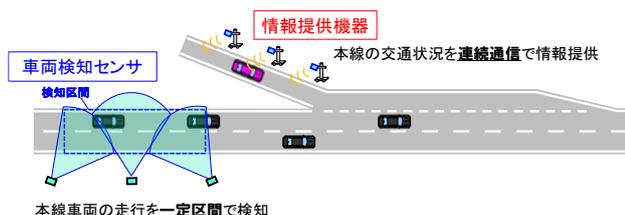


図-1 合流支援情報提供DAY2システム

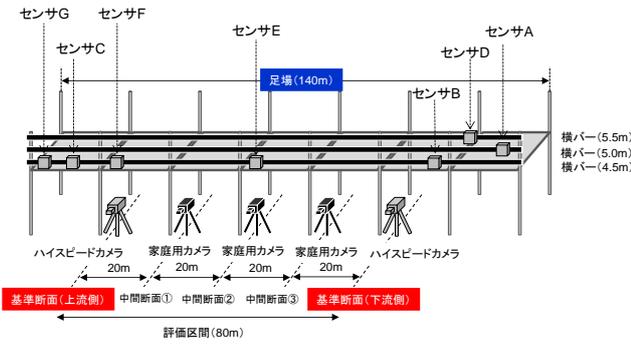


図-2 実験機器のレイアウト (試験走路)

表-1 センサ機種と設置位置 (試験走路)

センサ	機種：設置位置
A	レーダー：基準断面（下流側）より30m下流
B	LiDAR：基準断面（下流側）より10m下流
C	LiDAR：基準断面（上流側）より15m上流
D	レーダー：基準断面（下流側）より20m下流
E	LiDAR+カメラ： 基準断面（上流側）より40m下流
F	LiDAR：基準断面（上流側）
G	レーダー：基準断面（上流側）より20m上流

(幅140m) を設置し、7種類の車両検知センサを高さ約5mの位置に設置した(図-2, 表-1)。評価区間は80mとし、基準断面(上流側)及び基準断面(下流側)に6,000fpsのハイスピードカメラ(計2台)、中間断面(①~③)に60fpsの家庭用カメラ(計3台)を設置した。評価項目は、車両の「位置」、「速度」、「車間時間」、「車長」、「車種」とした。試験車両は、速度は20~120km/hの6速度帯、走行方法は、7パターン(単独走行、並走、並列走行、追越、車線変更、車間時間(2秒・3秒)、加速)とし、各センサで計測した値を「計測値」とした。

b) 実道

新東名高速道路 駿河湾沼津SA(下り)付近において、高速道路の路肩部に置基礎タイプのセンサ設置用土台を設置し、5種類の車両検知センサを高さ5mの位置に設置した(図-3, 表-2)。評価区間は試験走路と同様に80mとし、断面②の上下1mの位置にハイスピードカメラ

(計2台)、評価区間の上流側と下流側、上流側跨道橋に家庭用カメラ(計3台)を設置した。

評価項目は、試験走路と同じ車両の「位置」、「速度」、「車間時間」、「車種」に加え、「車両検知率」とした。なお、「位置」、「速度」については、試験車両(実勢速度で走行)を対象に各センサが計測した値、「車間時間」、「車種」、「車両検知率」については、実交通車両を対象に各センサが計測した値を「計測値」とした。

(2) 計測値の精度確認方法

「計測値」については、以下で定義する「真値」と比較することにより、計測誤差の評価を行った。

a) 位置

試験車両にRTK測位が可能なGNSS受信機を設置し、位置情報を検知し、当該検知結果(NMEA形式)を平面直角座標系に変換した値を「真値」とした。なお、位置については、「真値」と「計測値」の離隔について、車両の進行方向と横方向(進行直角方向)に分解して、方向ごとの計測誤差を比較した。

b) 速度

試験走路では、ハイスピードカメラで試験車両の側面に設置した赤白メジャーテープを撮影し、車両が2m移動する際の通過時刻差から算出した速度を「真値」とした。

実道では、断面②の前後各1mにハイスピードカメラを設置し、撮影した画像の車頭及び車尾の通過時刻差からそれぞれ走行速度を算出し、両者の平均値を速度の「真値」とした。

表-2 センサ機種と設置位置 (実道)

センサ	機種：設置位置
A	レーダー：断面④より25m下流
B	LiDAR：断面④より10m下流
C	LiDAR：基準断面より30m上流
D	レーダー：断面④より20m下流
E	LiDAR：基準断面より25m上流 断面④より30m下流

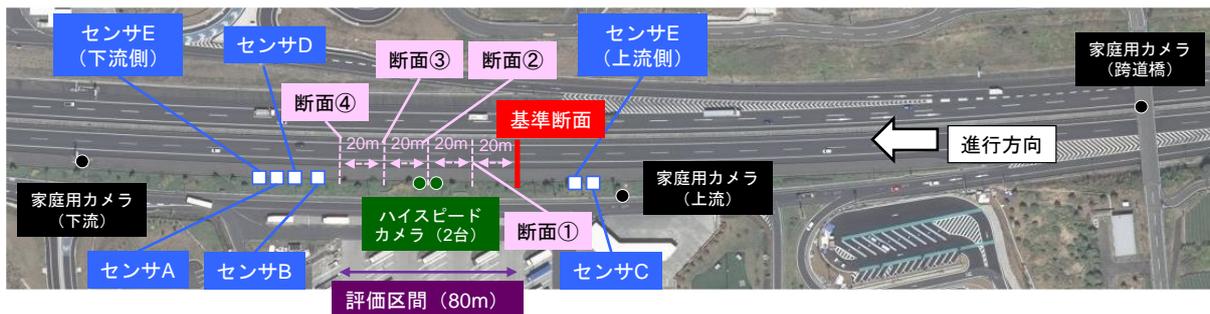


図-3 実験機器のレイアウト (実道)

c) 車間時間

試験走路では、中間断面①～③に設置した家庭用カメラ（合計3台）、実道では、上流側と下流側に家庭用カメラを設置した。

当該カメラ映像から車両の車頭・車尾の各断面の通過時刻を読み取り、同一車線の前方車両の車尾と後方車両の車頭の通過時刻差分を「真値」とした。

d) 車長（試験走路のみ）

試験車両の自動車検査証に記載された車長を「真値」とした。

e) 車種

試験走路では、事前に設定した走行パターンをもとに、車種（小型車、大型車、二輪車）を特定し、各車種別の台数を「真値」とした。

実道では、上流側跨道橋に設置した家庭用カメラ画像から、任意の時間帯において基準断面を通過した車両の車種（小型車、大型車、二輪車）を確認し、各車種別の台数を「真値」とした。

f) 車両検知率（実道のみ）

上流側跨道橋に設置した家庭用カメラ画像から、任意の時間帯において基準断面を通過した車両を確認し、センサで検知した車両と比較した。

3. 車両検知センサ（DAY2）の精度確認結果

(1) 評価の基本的考え方

実証実験で用いる車両検知センサは、計測誤差の「平均値」と「標準偏差」の双方を極力小さくするようにチューニング（調整）を行うことが理想であるが、現実的には困難である。そこで、本実証実験においては、計測誤差の平均値を重視する形でチューニングを行った。こ

表-3 速度の計測誤差（試験走路）

基準断面（上流側） [km/h]							
センサA	B	C	D	E	F	G	
平均値	0.140	0.190	-18.060	-0.020	0.530	0.480	0.850
平均値*	0.250	1.960	18.400	0.250	1.390	1.390	1.030
95%tile値	0.517	5.336	44.888	0.661	4.476	4.480	2.720
標準偏差	0.480	3.050	15.000	0.360	2.020	2.020	1.210

基準断面（下流側） [km/h]							
センサA	B	C	D	E	F	G	
平均値	0.020	-1.530	0.120	-0.890	-2.370	-0.400	0.190
平均値*	0.410	2.860	1.990	1.250	5.930	1.130	0.780
95%tile値	0.737	7.128	5.630	4.091	13.132	3.214	1.310
標準偏差	1.320	3.270	3.520	1.820	13.080	3.410	1.860

*絶対値の平均値 N=200～208

のため、以下においては、計測誤差について平均値を中心に評価することとする。

(2) 試験走路での精度確認結果

a) 速度

速度の計測誤差は、表-3の通りである。最も精度の良いセンサ（絶対値の平均値）で、0.250km/hであった（センサAとD、基準断面（上流側））。計測誤差の標準偏差は、基準断面（下流側）の方が大きい傾向にある。これは、「追越」、「車線変更」、「加速」など、上流側と下流側で車両の走行順序が変更となる走行パターンにおいて、車両検知センサが速度の異なる2台の車両が重なる瞬間に速度を計測する場合、速度の大きい車両と小さい車両の速度を入れ違えて計測する可能性があり、このことが計測誤差を大きくした一因であると推定される。

b) 車間時間

車間時間の計測誤差は、表-4の通りである。最も精度の良いセンサ（絶対値の平均値）で、0.010秒であった（センサF、中間断面②）。また、全てのセンサについて、中間断面①～③で計測誤差の大きな差異は確認されなかった。

表-4 車間時間の計測誤差（試験走路）

中間断面① N=71 [秒]							
センサA	B	C	D	E	F	G	
平均値	-0.072	0.012	-0.150	0.136	0.217	-0.004	0.052
平均値*	0.154	0.091	0.233	0.188	0.223	0.012	0.129
95%tile値	0.423	0.305	0.528	0.380	0.472	0.039	0.409
標準偏差	0.207	0.171	0.321	0.203	0.159	0.017	0.235

中間断面② N=62 [秒]							
センサA	B	C	D	E	F	G	
平均値	-0.107	0.120	-0.150	0.092	0.208	-0.006	0.023
平均値*	0.138	0.176	0.233	0.104	0.224	0.010	0.125
95%tile値	0.373	0.590	0.502	0.260	0.531	0.023	0.333
標準偏差	0.147	0.398	0.321	0.107	0.156	0.013	0.223

中間断面③ N=58 [秒]							
センサA	B	C	D	E	F	G	
平均値	-0.109	0.132	-0.114	0.028	0.203	-0.001	0.040
平均値*	0.141	0.200	0.234	0.056	0.263	0.013	0.110
95%tile値	0.337	1.088	0.591	0.159	0.642	0.028	0.304
標準偏差	0.137	0.446	0.330	0.070	0.241	0.020	0.145

*絶対値の平均値

表-5 車長の計測誤差 (試験走路)

基準断面 (上流側) [m]							
	センサA	B	C	D	E	F	G
平均値	0.685	-3.038	0.886	-3.037	0.029	0.035	-2.190
平均値*	1.143	3.058	1.114	3.037	0.244	0.213	2.244
95%tile値	2.400	5.415	2.683	4.370	0.547	0.440	6.127
標準偏差	1.541	1.360	1.231	0.972	0.761	0.741	1.860

基準断面 (下流側) [m]							
	センサA	B	C	D	E	F	G
平均値	0.850	0.900	1.474	-0.406	0.029	0.018	0.281
平均値*	0.938	1.632	1.567	0.924	0.244	0.230	1.128
95%tile値	1.860	4.009	3.398	1.726	0.547	0.462	3.978
標準偏差	0.915	1.833	1.250	1.105	0.761	0.784	1.694

*絶対値の平均値 N=215

表-6 車種の判定率 (試験走路)

	センサA	B	C	D	E	F	G
①	199	197	198	190	201	198	190
	98.5%	97.5%	98.0%	94.1%	99.5%	98.0%	94.1%
②	12	12	12	13	11	12	12
	92.3%	92.3%	92.3%	100%	84.6%	92.3%	92.3%
③	1	0	0	0	2	1	1
④	2	1	0	4	1	1	11
⑤	1	5	5	8	0	3	1

- ①: 小型・大型/小型・大型【正】 [台]
- ②: 二輪/二輪【正】 [台]
- ③: 二輪/小型・大型【誤】 [台]
- ④: 小型・大型/二輪【誤】 [台]
- ⑤: 検知漏れ

c) 車長

車長の計測誤差は、表-5の通りである。車長については、最も精度の良い (絶対値の平均値) で、0.213mであった (センサF, 基準断面 (上流側))。

d) 車種 (判定率)

車種の判定率は、表-6の通りである。最も精度の良いセンサで、「小型車・大型車」99.5% (センサE)、「二輪車」100% (センサD)であった。センサDを除くセンサで二輪車が検知しにくい傾向が見られ、誤検知や検知漏れも多い。なお、試験走路では、限定されたサンプルであることに留意する必要がある。

(2) 実道での精度確認結果

a) 位置

位置の計測誤差は、表-7の通りである。最も精度の良いセンサ (絶対値の平均値) で、進行方向0.48m, 横方向0.87mであった (センサD)。図-4には、センサDの計測誤差分布 (進行方向) を示す。なお、一部のセンサについて、計測値を真値と比較する上で必要な時刻同期が不正確であり、精度に影響を与えている可能性がある。

b) 速度

速度の計測誤差は、表-8の通りである。最も精度の良いセンサ (絶対値の平均値) で、4.566km/hであった (センサA)。図-5には、センサAの計測誤差分布を示す。なお、全てのセンサで計測誤差の平均値がマイナスとなった。これについては、センサの車両検知アルゴリズムが要因と考えられ、処理方法の改良によっては、計測誤差を改善できる可能性がある。

表-7 位置の計測誤差 (実道)

		[m]				
方向		センサA	B	C	D	E
進行方向	平均値	-14.96	0.56	0.29	-0.25	-0.27
	平均値*	31.58	1.49	1.28	0.48	0.67
	標準偏差	49.35	1.93	1.60	0.76	1.17
横方向	平均値	4.33	-0.06	-0.50	-0.36	-0.04
	平均値*	9.14	1.66	1.53	0.87	1.10
	標準偏差	14.45	3.00	2.58	1.95	2.66

*絶対値の平均値 サンプルは27走行, 578測点

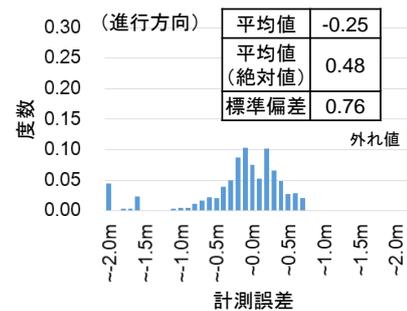


図-4 位置の計測誤差分布の例 (センサD, 実道)

表-8 速度の計測誤差 (実道)

		[km/h]				
		センサA	B	C	D	E
平均値		-4.566	-4.560	-4.788	-4.496	-4.651
平均値*		4.566	5.004	4.968	4.601	4.762
95%tile値		10.311	10.637	11.964	9.506	9.969
標準偏差		3.671	4.560	4.017	2.694	6.002

*絶対値の平均値 N=106~135

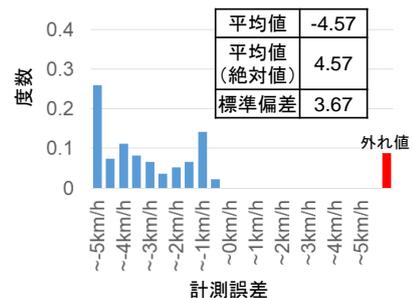


図-5 速度の計測誤差分布の例 (センサA, 実道)

c) 車間時間

車間時間の計測誤差は、表-9の通りである。最も精度の良いセンサ（絶対値の平均値）は、0.230秒であった（センサE，断面③）。また、全てのセンサにおいて、設置位置から遠い断面ほど、計測誤差が大きくなる傾向が見られた。

d) 車両（交通量）検知率

車両（交通量）検知率は、センサで検知した台数から「検知漏れ台数」と「過検知した台数」とを減算し、家庭用カメラの映像から読み取った台数で除して算出したものである。その結果は、表-10の通りである。最も精度の良いセンサで、99.1%であった（センサE）。

表-9 車間時間の計測誤差（実道）

断面①	[秒]				
センサA	B	C	D	E	
平均値	1.130	1.300	0.360	1.700	0.010
平均値*	1.480	1.360	0.630	2.080	0.280
95%tile値	7.600	6.826	2.158	12.500	1.355
標準偏差	5.800	4.380	3.370	5.290	1.560

断面②	[秒]				
センサA	B	C	D	E	
平均値	0.340	0.850	0.370	1.600	0.030
平均値*	0.690	0.920	0.670	2.000	0.250
95%tile値	2.553	3.483	2.533	11.986	0.849
標準偏差	3.490	3.530	3.740	5.260	1.450

断面③	[秒]				
センサA	B	C	D	E	
平均値	0.200	0.500	0.450	1.720	0.000
平均値*	0.490	0.620	0.750	2.100	0.230
95%tile値	1.942	1.478	2.887	13.286	0.942
標準偏差	2.560	3.750	3.670	5.540	1.080

断面④	[秒]				
センサA	B	C	D	E	
平均値	0.340	0.330	0.560	1.380	0.330
平均値*	0.530	0.740	0.750	1.570	0.430
95%tile値	2.258	2.308	2.950	8.363	2.083
標準偏差	2.260	2.750	2.920	4.540	1.650

*絶対値の平均値 N=1,690~3,001

表-10 車両検知率（実道）

	センサA	B	C	D	E
①	7,428	7,428	7,428	7,428	7,428
②	8,033	8,258	8,123	8,067	7,523
③	6,939	6,238	6,901	7,085	7,395
④=①-③		489	1,190	527	343
⑤=②-③		1,094	2,020	1,222	982
⑥=(②-④-⑤)/①		86.8	68.0	85.8	90.8
					99.1

- ①：カメラ映像からの読み取り台数
- ②：センサの検知台数 ③：カメラ映像と合致した台数
- ④：検知漏れ台数 ⑤：過検知した台数 ⑥：検知率 [%]

表-11 二輪車の判定率（実道）

車種	判定*	センサA	B	C	D	E
① 小型 大型	二輪×	6,891	6,094	6,717	6,984	7,358
② 二輪	二輪○	10	12	16	1	37
③ 二輪	二輪×	27	25	21	36	0
④ 小型 大型	二輪○	11	107	147	64	0
⑤	①+②+③+④	6,939	6,238	6,901	7,085	7,395
⑥	(①+②)/⑤	99.5%	97.9%	97.6%	98.6%	100%
⑦	②/(②+③)	27.0%	32.4%	43.2%	2.7%	100%

⑤：合計台数 ⑥：車種判定率 ⑦：車種判定率
*○：二輪車の可能性あり *×：二輪車の可能性なし

なお、結果を考察する上では、評価断面（基準断面）に対するセンサ位置の離隔について、留意する必要があると考えられる。

e) 車種（二輪車の判定率）

車種は、センサが検知しにくい車種である二輪車に着目した。表-10の③カメラ映像と合致した台数を対象とした二輪車の判定率は、表-11の通りである。最も精度の良いセンサで、判定率は100%であった（センサE）。

4. 試験走路実験と実道実験の結果の比較

表-12に、実験別の各評価項目の計測誤差の最小値をまとめた。どちらの実験にも共通する評価項目では、二輪車判定率を除いて、実道の計測誤差の方が大きくなった（特に速度と車間時間で差が大きい）。実道と試験走路では、実験機器のレイアウトや実験時期等の違いによる影響も考えられるため、精査が必要である。

表-12 各評価項目の計測誤差の最小値

評価項目	試験走路	実道	
位置(進行方向)[m]	平均値*	0.23	0.48
	標準偏差	1.73	0.80
位置(横方向)[m]	平均値*	0.19	0.87
	標準偏差	0.85	1.98
速度[kmh]	平均値*	0.25	4.50
	標準偏差	0.36	2.69
車間時間[秒]	平均値*	0.01	0.23
	標準偏差	0.02	1.08
車長[m]	平均値*	0.21	-
	標準偏差	0.74	-
断面通過時刻[秒]	平均値*	0.02	0.07
	標準偏差	0.09	0.08
車両(交通量)検知率[%]	-	99.1	
二輪車判定率[%]	100	100	

*絶対値の平均値
項目ごとに最も計測精度の良かったセンサの計測誤差を掲載

5. おわりに

本稿では、高速道路の合流部において安全で円滑な自動運転を実現するための合流支援情報提供システム（DAY2システム）に用いる車両検知センサについて、試験走路と実道での実証実験を通じた精度確認の結果を報告した。

確認した精度については、今後、当該システムの仕様書等を作成する上での参考値としての活用が考えられる。

いずれの実験も短期間（3日間）での実験である点には、留意する必要がある。当該システムの実装を目指すには、交通状況や気象条件の違いによる計測精度の違い等、長期間で多様な条件下で取得したデータに基づいた検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 中川敏正, 関谷浩孝, 中田諒: 高速道路合流支援システム車両検知センサの精度確認, 第18回ITSシンポジウム2020, 2020.

(2021. ?? ?? 受付)

STUDY ON THE ACCURACY OF VEHICLE DETECTION SENSOR FOR MERGING SUPPORT SYSTEM (DAY2 SYSTEM) ON EXPRESSWAY

Ryo NAKATA, Teruaki HANAMORI, Ryota FUJIMURA, Toshimasa NAKAGAWA
and Hiroataka SEKIYA