

Analyse du trafic routier par caméra intelligente: MvTraffic

Christophe Chaudy, Jean Francois Delaigle, Multitel
Benoît Macq, UCL

Résumé:

L'analyse du trafic routier est aujourd'hui au cœur de nombreuses préoccupations comme la mobilité, la sécurité ou l'environnement. Nous présentons MvTraffic, un système autonome d'analyse du trafic routier à partir d'images vidéo. Ce système est capable de mesurer le volume et les caractéristiques du trafic en temps réel, de jour comme de nuit. MvTraffic utilise un ensemble complémentaire de techniques pour extraire du flux d'images la trajectoire de tous les véhicules. De part ses besoins limités en ressource, ce système peut être directement intégré dans une unité embarquée de traitement.

Abstract:

Today, road traffic monitoring is essential for numerous concerns like mobility, safety or environmental issues. We present MvTraffic, an autonomous system for road traffic analysis based on video image processing. This system is able to measure traffic's amount and attributes in real time, in daytime and nighttime conditions. MvTraffic uses a set of complementary techniques to extract from the image flow all the vehicles trajectories. Its limited requirements allow that system to be integrated in an embedded processing unit.

1. Motivations: pourquoi analyser le trafic routier ?

Ces dernières années le trafic routier et autoroutier a été un sujet d'étude et de débats importants pour les pouvoirs publics. Les thèmes de la mobilité, de la sécurité et de l'environnement sont souvent des sujets d'actualité et le trafic routier est régulièrement mis en cause. Des outils de mesure et d'analyse ont donc été mis en place pour fournir une information rapide et fiable sur les conditions de circulation. Le premier de ces outils est le système capable de fournir, en temps réel, une évaluation du volume et des caractéristiques du trafic à un point donné du réseau routier. Après fusion et analyse, ces données seront utilisées pour répondre à nombre de préoccupations, comme par exemple:

- la mobilité, avec la diffusion instantanée des conditions de circulation (info trafic), la réalisation de péage automatique ou la gestion intelligente des feux de circulation et des priorités, la planification de nouveaux aménagements ou nouvelles infrastructures, voire un jour la variabilité des capacités de circulation (voir exemple de l'accès à Bruxelles fin 2003),
- la sécurité avec la détection automatique d'incident ou suivi de véhicule dans les tunnels,
- l'environnement et la santé publique avec le contrôle de la pollution et la régulation des infrastructures (éclairage, ventilation des tunnels).

2. Les différentes techniques de mesure [1]

On distingue généralement deux catégories de capteurs: les systèmes intrusifs (qui sont installés dans la chaussée) et les systèmes non-intrusifs (installés aux abords des routes, en portique ou berne centrale ou encore embarqué dans des véhicules). Les capteurs intrusifs sont la plupart du temps des boucles inductives, placées dans chaque voie de circulation, qui vont réagir au passage des véhicules. La mise en place d'une double boucle permet de mesurer également la vitesse et la longueur des véhicules. L'inconvénient majeur des boucles inductives est la nécessité d'intervenir dans la route (et donc de perturber le trafic) pour l'installation et la maintenance. De plus, les boucles sont limitées à des fonctions de comptage et de mesure et de classification individuelle par bande de circulation.

D'autre part, les capteurs non-intrusifs sont des senseurs distants qui utilisent diverses technologies: radar, laser, ultrasons ou vidéo. Le radar est capable de compter et de mesurer la vitesse des véhicules (par effet Doppler ou par modulation de fréquence) sur une bande de circulation quel que soit le climat. Les radars sont généralement des équipements assez onéreux. Les lasers émettent un faisceau d'énergie qui balaie la surface de détection (une voie de circulation). Le temps de parcours est mesuré et sert à modéliser un profil du véhicule. En utilisant deux plans de détection successifs, un système laser est également capable de mesurer la vitesse du véhicule. Avec la capture du profil 3D du véhicule, les lasers permettent une classification détaillée et précise des véhicules. Ils opèrent généralement pour une seule bande de circulation et sont assez coûteux. Les capteurs ultrasoniques travaillent de façon similaire au radar mais dans une gamme de fréquence plus faible (20000 Hz). Ils peuvent être perturbés par les émissions de certains véhicules et ont des difficultés à mesurer des déplacements rapides. Pourtant, les considérations économiques font de ces capteurs un choix privilégié des opérateurs.

Enfin, un capteur basé sur l'analyse vidéo va utiliser une caméra pour capturer des images de la route à analyser. Une caméra placée à une distance suffisante peut enregistrer jusqu'à 2x3 bandes de circulation. Une unité de traitement va ensuite réaliser l'interprétation de ces images pour extraire les véhicules et évaluer leur comportement. Les caméras opérant dans le domaine du visible, elles sont affectées par tous les phénomènes qui altèrent la visibilité (nuit, pluie, neige, brouillard...). Cependant, la caméra est devenue aujourd'hui un capteur fiable et très peu coûteux et d'autre part, elle fournit une représentation (les images) directement exploitable par l'être humain, car ce signal est proche de celui perçu par le cerveau et surtout l'œil, qui en est un de ces capteurs privilégiés. Elle a été largement installée sur les routes ces dernières années pour des besoins de vidéo surveillance passive.

3. L'intérêt d'une approche vidéo

Malgré les nombreuses recherches dans le domaine de la vision par ordinateur, l'analyse et la compréhension automatique du trafic reste un challenge. Le capteur vidéo semble être le choix d'avenir parce qu'il offre toutes les données nécessaires à la réalisation de nombreuses fonctions (aussi bien du comptage de véhicule que de la détection d'incident). C'est un capteur très flexible et économiquement intéressant. Cependant, les processus de traitement chargés d'analyser ce flux vidéo sont des systèmes complexes et difficiles à développer. Ils doivent être efficaces pour tous types de trafic (et jusqu'à 2x3

bandes de circulation) et dans toutes les conditions possibles d'observation. Ils doivent réaliser plusieurs fonctions et générer des résultats en temps réel. Plusieurs produits existent aujourd'hui [2,3,4,5] qui répondent partiellement à ces critères, mais les nouveaux développements en matière d'algorithmique et les puissances de calcul offertes par les ordinateurs modernes ouvrent de nouvelles perspectives dans l'analyse de trafic.

Les recherches effectuées au sein de l'équipe Multivision du centre de recherche Multitel [6] ont motivées le développement d'une nouvelle plate-forme d'analyse intelligente du trafic routier. Grâce à l'utilisation de nouvelles techniques de vision par ordinateur utilisable sur les architectures moderne d'ordinateur, Multivision à mis au point un système d'analyse et d'interprétation du trafic routier. Les objectifs de MvTraffic sont les suivants:

- un monitoring précis du trafic pour tout type de trafic et de conditions (jour, nuit, pluie, ombres...). Le monitoring généré pour chaque véhicule, un temps de passage, une vitesse, un taux d'occupation et une classe.
- une détection d'incident capable de signaler un accident, un objet sur la chaussé, un véhicule arrêté sur la bande d'arrêt d'urgence ou un véhicule a contre sens.
- une mise en place facile et rapide, dans des situations diverses (portique, poteau d'éclairage, tunnel...)
- un système économique (multivoies, coût du matériel limité et peu de maintenance)

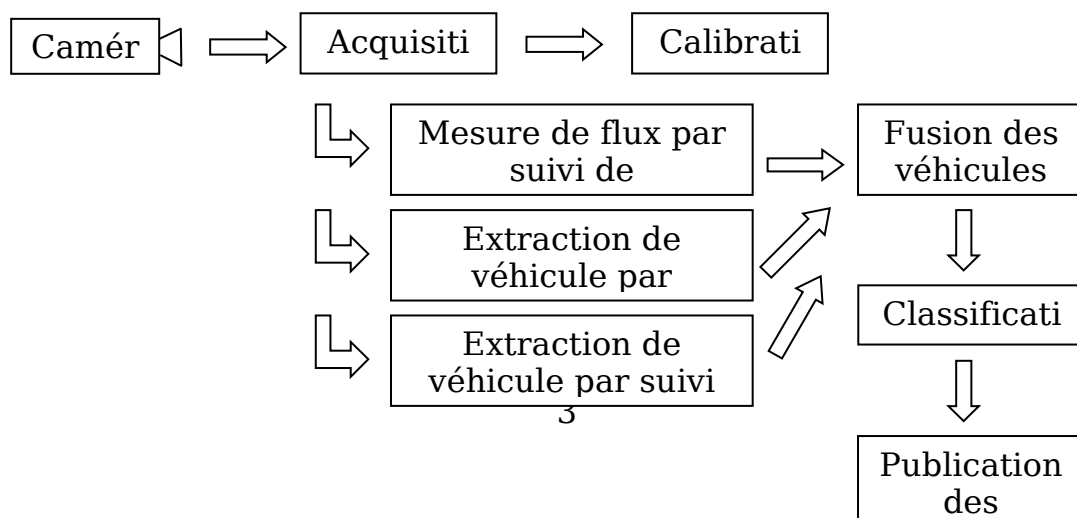
Le chapitre suivant va détailler les techniques utilisées pour extraire des images les véhicules et leurs caractéristiques.

4. L'application MvTraffic

L'objectif de l'application MvTraffic est de réaliser en temps réel l'analyse du trafic routier de plusieurs voies de circulation à partir d'images vidéo. Le nombre de véhicules pour chaque voie, une mesure de leur vitesse et des taux d'occupation doivent être générés. De plus les véhicules doivent être classifiés en 3 ou 5 catégories (voiture, camion...). Ce système doit opérer de jour comme de nuit quelles que soient les conditions météorologiques.

4.1. Architecture générale

L'architecture du système MvTraffic est basée sur la plate-forme logicielle de traitement temps réel Mvision développée au sein de l'équipe Multivision. Depuis la caméra, le flux des images et des données va circuler entre les différents modules de traitements. Le schéma fonctionnel ci-dessous résume le traitement de l'application MvTraffic.



Nous allons dans les chapitres suivants, détailler ces différents modules et tout particulièrement les modules d'extraction des véhicules.

4.2. Acquisition de la vidéo

La qualité des images vidéo est un facteur important pour la robustesse et la précision de l'analyse. Les images doivent être nettes et contrastées, de jour comme de nuit, quelles que soient les conditions météorologiques. La configuration minimale suffisante est un flux d'image au format PAL (résolution de 720x576 pixels entrelacés à une fréquence de 25 Hz) issu d'une caméra standard noir et blanc. C'est le type de caméra le plus utilisé et le plus économique. Les services de surveillance des routes disposent déjà aujourd'hui d'un nombre important de ces caméras en fonction. Cependant, si le système d'analyse doit fournir des mesures très précises (en vitesse et caractéristiques des véhicules) alors il est possible d'utiliser des caméras plus performantes, capables de fréquences et/ou de résolutions plus élevées.

4.3. Calibration des images de la caméra

La calibration est une étape importante de la mise en place du système. Son objectif est de déterminer, pour une position de caméra fixée, la transformation géométrique de l'espace de l'image (2D) vers l'espace de la route (3D) et réciproquement. Cette information est nécessaire pour convertir les orientations et les distances exprimées en pixel dans l'image vers des mesures dans l'espace réel de la route (direction des véhicules, vitesse et dimensions). L'outil de calibration interactif de MvTraffic procède ainsi:

- repérage dans l'image de deux lignes parallèles appartenant à la route
- orientation du plan de la route
- saisie de 2 longueurs sur la route

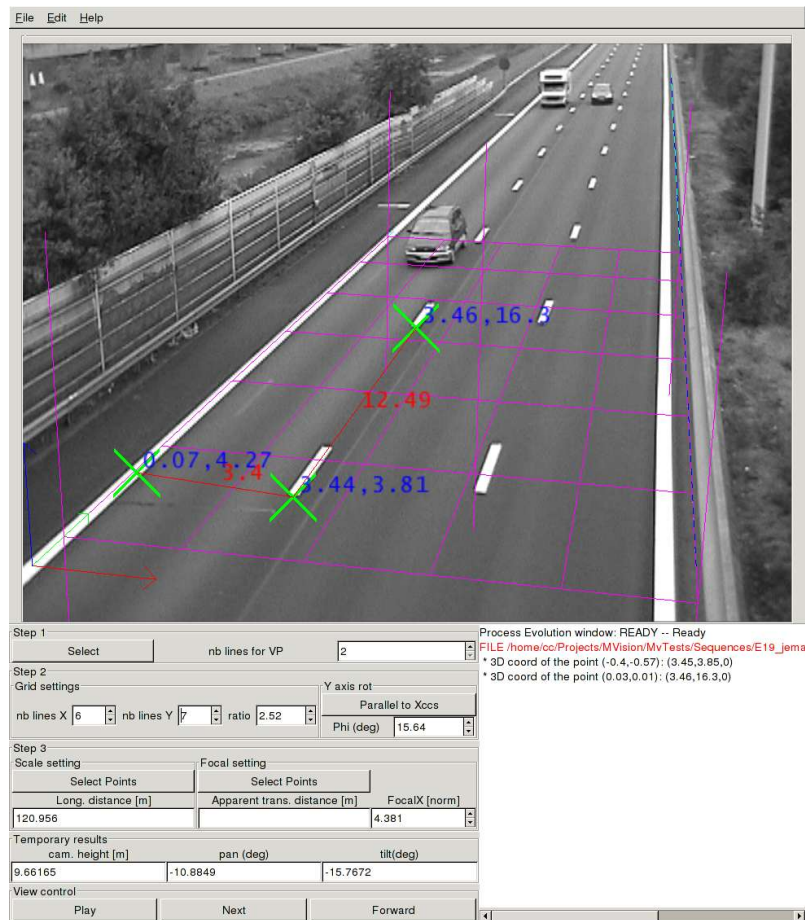


Figure 1: L'interface de calibration

En connaissant ces paramètres il est possible de déduire la transformation projective qui exprime le passage d'un point de l'espace réel (3D) vers un point de l'image et son inverse, la transformation d'un pixel de l'image vers un point de la route. La calibration est une opération réalisée à la mise en place du système qui ne doit être mise à jour que si la caméra est déplacée.

4.4. Extraction des véhicules

Le cœur du système d'analyse est composé des algorithmes qui extraient du flux vidéo les caractéristiques de tous les véhicules individuels qui traversent le champ de la caméra. Les conditions d'observation et de trafic étant très variées (jour et nuit, trafic fluide et bouchon, soleil et pluie...), MvTraffic utilise 3 algorithmes complémentaires qui donnent chacun de bons résultats dans des conditions spécifiques. Deux reposent sur l'analyse de profils de luminance capturés sur des segments parallèles à la direction de déplacement des véhicules. La troisième technique cherche et suit dans l'image le déplacement des phares des véhicules.

4.4.1. Définition et utilisation des profils de luminance

L'intérêt des profils de luminance est double: d'une part ils fournissent une représentation simple et compacte dans laquelle les paramètres que l'on veut mesurer (position, taille et vitesse des véhicules) sont présents et d'autres parts ils réduisent la complexité du problème et donc le volume de calcul nécessaire.

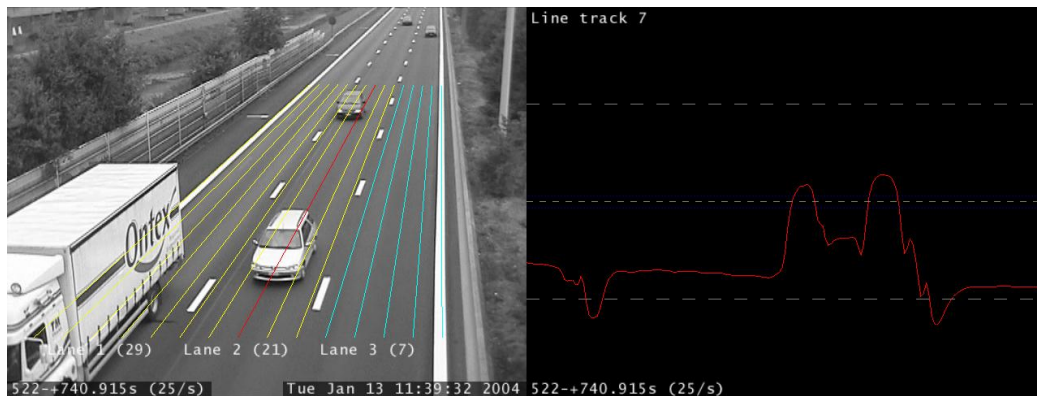


Figure 2: L'image capturée et la courbe de luminance correspondante à un profil

Si nous faisons l'hypothèse que les véhicules se déplacent principalement en ligne droite et à vitesse constante sur la route (sur une fenêtre de taille limitée, généralement de 15 à 30 m de long), le suivi des variations de luminance provoquées par un véhicule pendant sa traversé d'un profil permet de caractériser aussi bien sa position, que sa longueur et sa vitesse. Ainsi, deux techniques travaillent sur l'analyse de profils successifs, une adaptée à la mesure de la vitesse des flux de véhicules dans toutes les conditions, y compris le cas difficile de trafic dense et des bouchons et l'autre pour la mesure de véhicules individuels par segmentation.

4.4.2. La segmentation des véhicules

La segmentation est le processus qui va séparer du profil les pixels des objets mobiles (véhicule) des pixels du fond (route). Une fois la segmentation réalisée, l'avant et l'arrière du véhicule sont repérés et les ombres possibles sont éliminées. Le suivi dans le temps des positions précises de l'avant et de l'arrière du véhicule permet de construire la trajectoire et de déduire la vitesse, la longueur et une estimation de la hauteur. Ces mesures réalisées pour un même véhicules sur plusieurs profils parallèles sont fusionnées et les caractéristiques finales de l'objet sont calculées.

* segmentation des objets mobiles

Produire la segmentation du véhicule revient à calculer la différence entre le profil courant capturé et un profil de référence représentant le fond (c'est à dire la route sans aucun véhicule). Ce profil de référence doit être mis à jour régulièrement pour intégrer les changements de condition (illumination, ombres, pluie). Cette mise à jour est effectuée quand aucun véhicule n'est présent sur le profil.

Le profil binaire de segmentation est construit en prenant la valeur absolue des différences pour chaque pixel entre la référence et le profil courant. Un algorithme simple de bouchage de trous va filtrer cette segmentation.

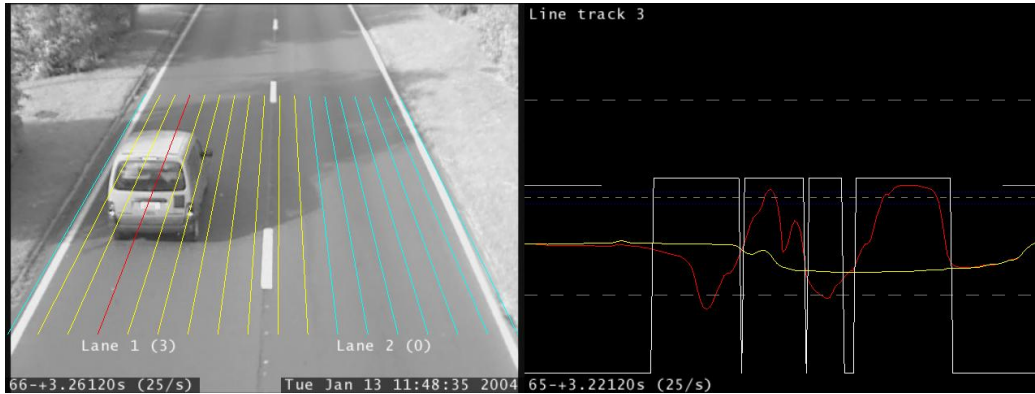


Figure 3: Segmentation du véhicule par différence avec un profil de référence

* extraction de l'avant et de l'arrière

Du profil de segmentation il est possible d'extraire l'avant de véhicule (front montant) et l'arrière de véhicule (front descendant). Remarquer que plusieurs véhicules peuvent être présents, totalement ou partiellement, sur un profil. La segmentation simple réalisée ne permet pas de filtrer les ombres et pénombres projetées par le véhicule sur la route, il est donc nécessaire de corriger les positions avant et arrière pour recalculer les positions sur le véhicule.

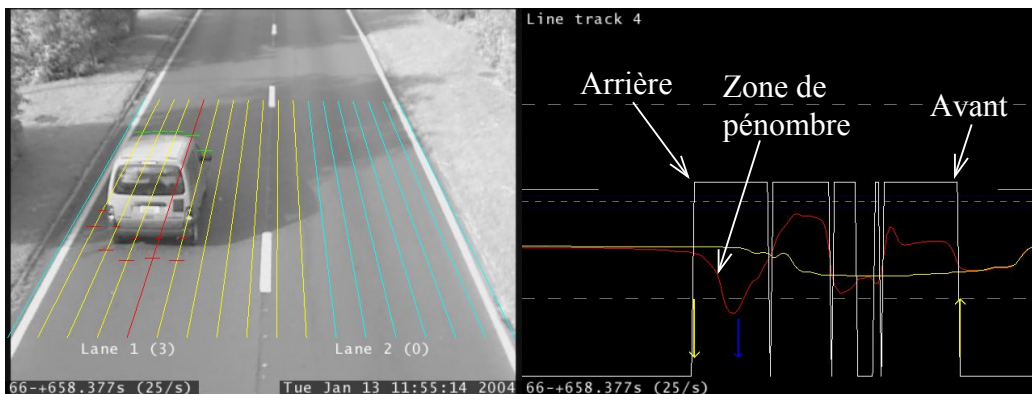


Figure 4: Recherche de l'avant et de l'arrière avec suppression des ombres et pénombres

* construction des trajectoires

Après correction, les positions avant et arrière du véhicule sont converties de l'espace de l'image vers le plan de la route. Cette « rétro-projection » ne permet pas de calculer la hauteur des positions par rapport à la route, uniquement une position projetée sur le plan de la route. Cependant, après construction de trajectoire à partir de séquence de positions, la vitesse mesurée (la pente de la droite représentant la trajectoire) est proportionnelle à la hauteur de la position suivie. Il est donc possible en mesurant le rapport de vitesse entre la trajectoire rétro-projetée de l'avant et de l'arrière du véhicule de mesurer le rapport des hauteurs entre l'avant et l'arrière. Tous ces calculs sont réalisés avec l'hypothèse de vitesse constante des véhicules, ce qui est probable pour un trafic fluide sur une zone observée de l'ordre de 20 m.

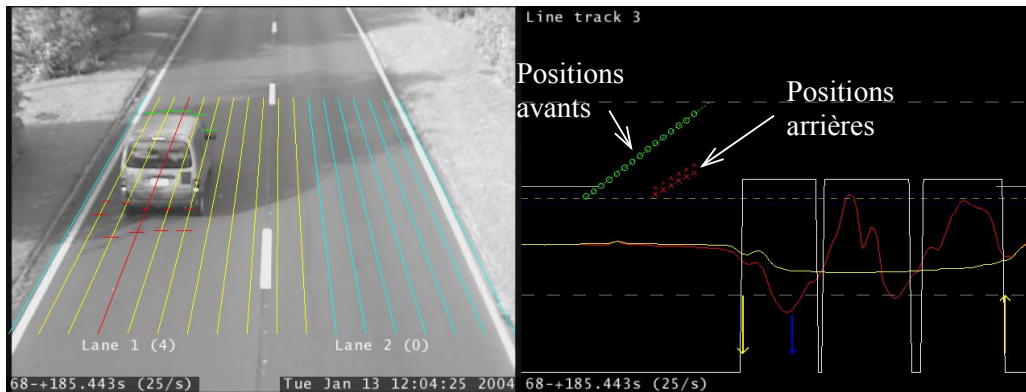


Figure 5: extraction des trajectoires avant et arrière

* calcul de la vitesse, hauteur et longueur

La vitesse du véhicule est déduite de la vitesse de la position avant ou arrière, en fonction du type de vue (véhicule en approche ou véhicule s'éloignant). La différence de hauteur entre l'avant et l'arrière est donnée par la formule suivante: $H2/H1=V1/V2$, avec $H1$ et $H2$ les hauteurs des deux positions par rapport à la caméra et $V1, V2$ les vitesses projetées sur le plan de la route de ces deux positions. En supposant que l'une des positions utilisées (avant ou arrière) est prise au niveau du sol, la hauteur de la caméra étant connue, on déduit la hauteur de l'autre position par rapport à la route. La longueur du véhicule est simplement la distance entre l'avant et l'arrière, avec une correction de la projection qui dépend de la hauteur calculée précédemment.

* fusion des multiples mesures, génération de véhicules

L'extraction de ces mesures est réalisée pour chacun des profils parallèles qui couvrent la route. Un véhicule affectant plus d'un profil, une fusion des mesures calculée sur ces profils est réalisée. Cette fusion garantit une meilleure robustesse, une précision accrue, ainsi qu'une estimation de la largeur du véhicule.

4.4.3. La mesure de vitesse de flux

Le processus de segmentation donne de bon résultat quand il est possible de séparer des véhicules consécutifs sur l'image (c'est à dire qu'une distance d'au moins un véhicule existe entre deux véhicules). Dans des situations de trafic dense ou d'embouteillage, une autre approche est nécessaire pour estimer la vitesse et la densité du trafic. MvTraffic utilise une technique de mise en correspondance de caractéristiques pour mesurer des déplacements sur un profil de luminance. Cet algorithme est donc capable de fournir, pour chaque voie de circulation, une estimation de la vitesse du flux des véhicules dans le cas de trafic très dense.

* détection de caractéristiques sur le profil

Sur un profil de luminance, un certain nombre de caractéristiques remarquables vont être choisies. Ces caractéristiques sont un sous-ensemble des maxima ou minima locaux et des points d'inflexion remarquables.



Figure 6: Sélection de caractéristique sur un profil: maxima, minima et points d'inflexion

* mise en correspondance des caractéristiques des 2 profils successifs

Les listes de caractéristiques sélectionnées dans deux profils capturés à des temps différents sont ensuite mises en correspondance. Cet appariement est réalisé en minimisant les distances entre les deux ensembles de caractéristiques, distance exprimée en terme de luminosité, de gradient et de position dans le profil.



Figure 7: Mise en correspondance des caractéristiques de deux profils consécutifs

Un filtrage est réalisé sur l'ensemble des appariements (couple de caractéristiques) pour supprimer les déplacements non significatifs comme ceux générés par des caractéristiques prises sur la route (dû au marquage au sol par exemple).

* extraction de la vitesse

Après transformation des positions des caractéristiques de l'espace image vers l'espace réel de la route, la vitesse est obtenue par le rapport entre les positions et le temps entre les deux profils considérés. En général, plusieurs caractéristiques sont sélectionnées par profil et donc un ensemble de vitesses est calculé. La disparité de ces vitesses est due aux hauteurs différentes des points considérés, la vitesse la plus faible représentant toujours la caractéristique la plus proche du sol et donc la vitesse la plus significative.

4.4.4. Le suivi des phares

Les images de trafic routier obtenues de nuit par une caméra CCD standard peuvent avoir des propriétés assez différentes des images obtenues de jour:

- faible contraste dû à un éclairage limité (peu de détail sur les véhicules)
- saturation des phares, surtout si les véhicules sont vus de face
- reflet des phares sur la chaussée, particulièrement visible par temps de pluie
- éventuellement production de lumière parasite dans l'objectif de la caméra
- temps de pose élevé (les objets en mouvement sont flous si leurs vitesses apparentes sont élevées)

Ces conditions peuvent également être présente en journée si la situation météorologique induit un éclairage faible. Pour continuer à extraire correctement les véhicules dans ces conditions, MvTraffic utilise une technique de suivi de phares avec filtrage des réflexions. Cet algorithme opère sur toute la zone de la route pour d'abord isoler les régions correspondantes aux phares des véhicules. Ensuite le suivi de ces régions va générer un ensemble de trajectoires qui seront regrouper pour former la trajectoire d'un véhicule.

* segmentation des phares

Les phares des véhicules sont localisés dans l'image par une recherche sur les régions de pixels satisfaisant les conditions suivantes:

- valeurs de luminance des pixels de la région élevées
- variance des luminances des pixels de la région faible
- taille de la région correspondant à la taille projetée d'un phare

Ce filtre permet d'isoler rapidement dans l'image les régions représentant potentiellement un phare, mais peut aussi sélectionner des reflets et autres objets parasites. C'est le suivi temporel de ces régions qui va rejeter les objets indésirables en utilisant un ensemble de critères spatio-temporels.

* extraction des trajectoires

A partir de l'ensemble des positions successives des phares, cette fonction cherche les trajectoires les plus probables dans l'espace réel. Il s'agit de trouver des droites dans un espace 3D formé par les deux axes de la route et par le temps. Dans ce traitement également, l'hypothèse de vitesse constante des véhicules est utilisée. Pour être retenu, une trajectoire doit avoir une longueur et une vitesse cohérente.



Figure 8: Segmentation des phares et extraction des trajectoires

* filtrage des trajectoires, génération de véhicules

Après extraction des trajectoires des objets, il s'agit de trouver la trajectoire du véhicule. Pour cela, MvTraffic recherche deux trajectoires parallèles et cohérentes qui correspondent aux deux phares d'un véhicule. La distance entre les phares est mesurée et servira à la classification du véhicule.

4.4.5. La fusion des résultats des différentes méthodes

Les différentes méthodes d'extraction de véhicules présentées précédemment fonctionnent en parallèle dans le système MvTraffic. Chacune produisant des véhicules, parfois équivalents, parfois uniques. Une méthode de fusion doit donc réaliser la sélection des véhicules pour avoir des résultats dans toutes les conditions. C'est l'analyse des trajectoires des véhicules issus des différentes méthodes qui va déterminer si deux véhicules extraits sont en fait les mêmes. Les critères évalués sont les suivants:

- date d'entrée et de sortie de la zone de détection
- voie de circulation
- vitesse mesurée

A l'issue de la fusion, une liste de véhicules consolidée, extraits soit par segmentation soit par suivi de phares est générée. Si la méthode de segmentation est principalement utilisée le jour et la méthode de suivi de phare la nuit, le fonctionnement simultané des algorithmes permet également de fournir des résultats pertinents dans les périodes de transition (nuit->jour et jour->nuit) et de réagir efficacement aux changements de conditions d'éclairage.

4.5. La classification des véhicules

Pour chaque véhicule, les différentes méthodes d'extraction produisent un ensemble de mesures: vitesse, bande de circulation, longueur, largeur et hauteur du véhicule. La fonction de classification a pour objectif de catégoriser le véhicule en un certain nombre de type prédéfinis. Voici quelques exemples de classification:

- en 3 classes: voiture, camionnette, camion
- en 5 classes: moto, voiture, camionnette, camion, camion avec remorque
- en 13 classes: moto, voiture, voiture avec remorque, camionnette, camion 2 essieux, camion 3 essieux, camion 4 essieux...

Il est clair que la simple connaissance des dimensions du véhicule n'est pas suffisante pour différencier 13 classes. Pour réaliser la classification en 3 ou 5 classes, MvTraffic utilise une modélisation probabiliste des paramètres mesurés en fonction de la classe du véhicule. Ce modèle est généré lors d'une phase d'apprentissage sur un échantillon représentatif du trafic. A l'issue de l'apprentissage, on dispose pour chaque mesure (longueur, largeur et hauteur), d'une modélisation de la probabilité d'appartenance à une classe. La classification calcule donc pour un nouveau véhicule la classe la plus probable en fonction de ses dimensions. Jusqu'à 5 classes peuvent ainsi être correctement discriminées par les dimensions extraites du véhicule. Pour réaliser une classification plus fine (13 classes par exemple), d'autres paramètres devront être extraits de l'image, mais le processus de classification restera le même.

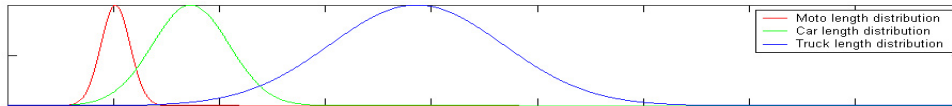
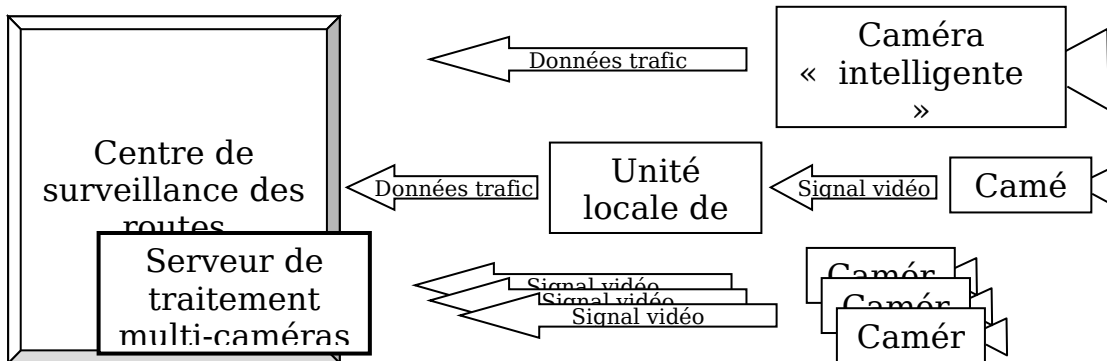


Figure 9: Distribution des longueurs en fonction de la classe de véhicule

5. Implantation et performances

Une attention toute particulière a été accordée au coût des traitements en terme de volume de calcul. En effet, pour des raisons pratique et économique, le système MvTraffic doit pouvoir réaliser, en temps réel, l'analyse d'une autoroute (jusqu'à 3 bandes de circulation) sur une unité de traitement équivalente à un PC Pentium 800Mhz. Il est donc envisageable de loger l'application MvTraffic directement à l'intérieur de caméra intelligente qui dispose d'une capacité de traitement comparable. Ce type de caméras est aujourd'hui disponible chez plusieurs fabricants. Le système est aussi décliné en version « serveur », capable de traiter à distance 4 flux de caméra simultanément sur un matériel de type PC performant.



6. Résultats

En collaboration avec la société Macq Electronique [7], le système MvTraffic est actuellement en test sur plusieurs sites en Belgique. Les situations et les conditions de trafic sont très variées, les figures ci-dessous donnent quelques exemple du système en fonctionnement:

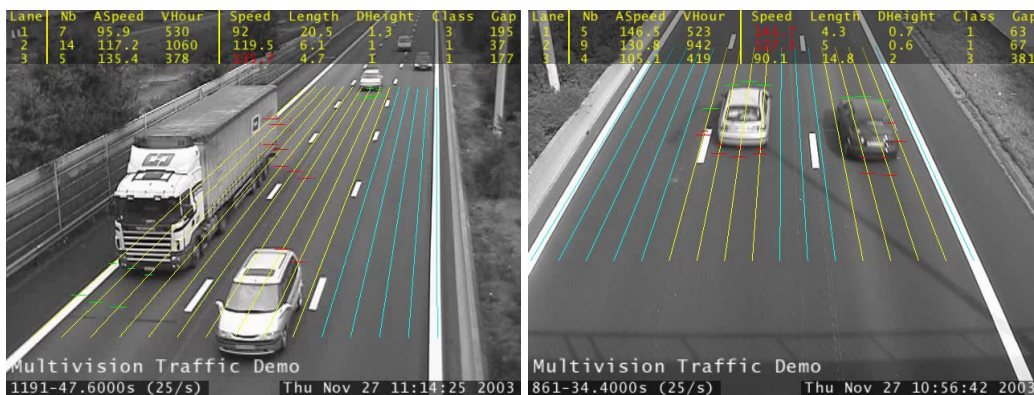


Figure 10: Positionnement latéral et central



Figure 11: Traitement de nuit et en tunnel

Ces tests exhaustifs permettront d'évaluer MvTraffic sur des cas concrets où un besoin réel de données temps réel a été constaté.

7. Conclusion

Nous avons présenté le système MvTraffic qui réalise automatiquement et en temps réel l'analyse du trafic routier. En fusionnant les résultats de plusieurs approches complémentaires, ce système est capable de produire des statistiques sur le volume et le type de trafic dans des conditions très diverses. L'utilisation des informations extraites pour l'analyse d'incident reste une fonctionnalité à intégrer. De plus, de nouvelles recherches sont entreprises pour, d'une part, augmenter la robustesse et la précision des méthodes, et d'autres part, faciliter l'installation des systèmes par un système de calibration automatique.

Références :

[1] Minnesota Department of Transportation, Office of Traffic Engineering/ITS Section, "Evaluation of non-intruse technologies for traffic detection", Report prepared for United States Department of Transportation, September 2002

[2] Panos G. Michalopoulos, Richard D. Jacobson, Craig A. Anderson, Thomas B. DeBruycker, "Automatic incident detection through video image processing", Traffic Engineering and Control, February 1993

[3] Traficon NV, www.traficon.com

[4] Citylog, www.citilog.fr

[5] Autoscope, www.autoscope.com

[6] Multitel ASBL, www.multitel.be

[7] Macq Electronique, www.macqel.be