

Estudo da viabilidade da monitorização do tráfego viário urbano através de Sensoriamento Participado*

Heitor Ferreira, David Navalho, Sérgio Duarte, Nuno Pregoça

CITI / Dep. de Informática - Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa,
Quinta da Torre, 2829 -516 Caparica, Portugal

Abstract. Real time monitoring of urban traffic is one key example application of participatory sensing principles. However, one issue still poorly scrutinized pertains to the degree of participation required to support such a service. This paper explores this issue. Specifically, we present our experimental findings concerning how key traffic sampling statistics evolve depending on the fraction of active participants in the monitored system. The results show that participation levels as little as 3% of participants can cover as much as 50% of the target area, rising to 80% with 10% participation.

Keywords: participatory sensing, urban traffic monitoring

Sumário. A monitorização em tempo real do tráfego viário urbano é um dos exemplos de aplicação mais paradigmáticos de aplicação de sensoriamento participado. Porém, uma questão ainda pouco escrutinada prende-se com o nível de participação, necessário para suportar um serviço deste tipo. Este artigo procura examinar e responder a esta questão. Em particular, é apresentado um estudo experimental da evolução de algumas estatísticas chave em função da fracção de participantes activos no sistema de monitorização. Os resultados mostram que uma participação de 3% é suficiente para cobrir 50% da área alvo, subindo para 80% com uma participação de 10%.

Palavras-chave: Sensoriamento participado, monitorização de tráfego urbano

1 Introdução

A contínua evolução tecnológica verificada ao nível dos dispositivos móveis tem permitido a sua utilização de formas inovadoras. O sensoriamento participado [3,4] é uma delas e passa pela criação de redes de monitorização de grande âmbito. Explorando a mobilidade de equipamentos equipados com sensores e dos seus utilizadores, procura-se cobrir áreas geográficas extensas sem recorrer ao investimento proibitivo de uma infra-estrutura de sensores montada para o efeito.

A monitorização da rede viária em áreas metropolitanas [9,12,5] é uma aplicação apelativa que exemplifica o potencial deste novo paradigma. Trabalhos anteriores

* Este trabalho foi parcialmente suportado por FCT/MCTES, projecto #PTDC/EIA/76114/2006 e CITI.

neste domínio [9,5] mostraram que é possível obter estatísticas detalhadas para áreas geográficas alargadas, recorrendo a um número muito reduzido de participantes (inferior a 10). Porém, tal é conseguido numa escala de tempo medida em dias, o que inviabiliza a monitorização de fenómenos transientes de curta duração, tais como situações de congestionamento de tráfego. Para uma monitorização deste género de eventos, em tempo real (ou próximo disso), existe a necessidade de, em cada momento, verificar-se uma cobertura adequada da zona a monitorizar. Balizar o nível de participação necessário para garantir essa cobertura é uma questão que, em larga medida, continua por escrutinar. A principal contribuição deste artigo centra-se nesse aspecto. Especificamente, relatam-se os resultados de um estudo experimental, baseado em simulação, onde se procurou avaliar a eficácia de uma solução de sensoriamento participado para a detecção atempada de anomalias no tráfego numa grande cidade, em função do nível de participação dos utilizadores potenciais.

A estrutura do restante do documento é a seguinte. Na secção 2 é feita uma breve revisão da bibliografia relacionada com o tema. Na secção 3, é apresentado o modelo aplicacional de sensoriamento participado que está na base deste estudo, seguindo-se uma descrição do ambiente experimental utilizado, na secção 5. Os resultados experimentais obtidos são detalhados e discutidos na secção 6. A secção 7 conclui o artigo com as considerações finais.

2 Trabalho Relacionado

São já diversas as aplicações que exploram o conceito de sensoriamento participado, umas de cariz mais individual [11], outras vocacionadas para comunidades de utilizadores [7]. De uma maneira geral, trata-se de combinar informação recolhida por múltiplos utilizadores e de diversos tipos de sensores, com vista a reconhecer padrões interessantes ou inferir novas informações. Alguns bons exemplos, já mencionados, incidem sobre a rede viária de grandes cidades. Neste grupo, o sistema CarTel [9] tem como temática central, o estudo de padrões de utilização das estradas e envolve o registo persistente dos movimentos de uma pequena frota de veículos. A análise estatística dos percursos realizados e das velocidades observadas permite, por exemplo, identificar locais de contenção frequente associados a semáforos. Numa linha semelhante, [5] tem como objectivo mapear irregularidades no pavimento das estradas, recorrendo a dados de acelerómetro. Em ambos os trabalhos, são monitorizados padrões de elevada persistência com um enfoque centrado no seu reconhecimento e menor preocupação na rapidez da detecção, contrariamente à questão que este artigo trata. Assim, o seu contributo reside na comprovação que a mobilidade dos sensores e a recolha de dados ao longo de diversos dias podem assegurar uma elevada cobertura geográfica com um reduzido número de dispositivos. Nericell [12] é outro trabalho que tem como alvo o reconhecimento de situações de congestionamento de estradas. Porém, a ênfase é colocada no tratamento da informação recolhida pelos diversos sensores para identificar correctamente a assinatura característica de um engarrafamento. Apesar de neste trabalho o tratamento local dos dados dos sensores indiciar uma intenção de detecção oportuna dos congestionamentos, não são apresentados re-

sultados que permitam extrapolar qual a fracção dos veículos necessária para isso ser conseguido à escala de uma grande cidade.

Em [6] é proposto o sistema 4Sensing - uma infra-estrutura descentralizada para suportar aplicações de sensoriamento participado. Uma das suas aplicações caso de estudo incide, precisamente, na detecção em tempo real de situações de engarrafamento, no caso, aplicada à cidade de Lisboa. A motivação está, sobretudo, na avaliação experimental do processamento distribuído de dados de sensoriamento participado, com menor preocupação no realismo do modelo de tráfego usado na simulação. Adicionalmente, está subjacente que todos os veículos são participantes activos e em grande número (50.000). O presente trabalho também assenta no sistema 4Sensing como base para exprimir e realizar computações. Contudo, para sustentar as conclusões, procurou-se, por um lado, variar significativamente a fracção dos veículos que recolhem dados para a aplicação e, por outro, utilizar um modelo de trânsito independente, referenciado em literatura científica [1]. Adicionalmente, optou-se por um processamento centralizado, de modo a evitar quaisquer eventuais interferências decorrentes da descentralização. Partindo destas premissas, este trabalho distingue-se dos demais ao examinar a viabilidade do modelo de sensoriamento participado para a monitorização em tempo real de fenómenos transientes em áreas geográficas extensas.

3 Modelo de sensoriamento participado

O modelo de sensoriamento participado baseia-se na existência de um grande número de participantes que obtêm informação sensorial usando os seus dispositivos móveis. A informação obtida dos sensores pode ser usada em bruto ou pré-processada localmente no dispositivo. Este pré-processamento local pode ter várias finalidades, entre as quais filtrar a informação a processar globalmente e produzir informação de mais alto nível - por exemplo, a partir de uma sequência de posições pode-se computar a velocidade.

A informação obtida nos dispositivos móveis deve ser processada globalmente de forma a inferir informação útil. Este processamento pode ser efectuado de forma centralizada [9], ou distribuída [6,8]. A arquitectura do sistema influencia as propriedades da informação produzida, incluindo a latência no processamento da informação, os recursos necessários em cada nó do sistema, a tolerância a faltas, etc.

Este trabalho pretende estudar a viabilidade da utilização do modelo de sensoriamento participado para monitorar o tráfego viário numa cidade. Assim, neste estudo assume-se que não existem limitações de recursos na transmissão e processamento da informação sensorial, i.e., que esta informação pode ser processada de forma centralizada num único nó e que pode ser propagada instantaneamente e sem faltas dos nós móveis para o nó que efectua o processamento. Obviamente, num sistema real estas condições não se verificam, sendo os resultados apresentados neste estudo o melhor que se poderia alcançar, usando os métodos de inferência descritos na próxima secção.

A inexistência, na prática, das condições óptimas consideradas neste estudo levará na prática a resultados de qualidade inferior ao obtido neste estudo. Sendo impossível quantificar a degradação da qualidade dos resultados que se pode

esperar na prática, porque esta depende das técnicas que os sistemas usam para lidar com os condicionalismos do ambiente de computação, é possível identificar as consequências esperadas devidas a diferentes factores, que se descrevem de seguida:

Limitação de energia A energia disponível num dispositivos móveis está normalmente limitada à capacidade da sua bateria. Como consequência, os dispositivos móveis têm uma capacidade limitada de obter e propagar informação sensorial. Para lidar com esta limitação, os dispositivos móveis devem tentar restringir a informação propagada à informação relevante para a computação global. Assim, por exemplo, na monitorização do tráfego viário, seria possível propagar apenas as situações em que as condições de trânsito não fossem boas.

Limitação da capacidade de processamento Num sistema em que exista um grande número de dispositivos móveis a propagar informação, a quantidade de informação a processar pode ser em quantidade superior à capacidade de processamento de apenas um nó. Neste caso, será necessário dividir o processamento por vários nós, o que permitirá dividir a carga entre os vários nós. Face a uma solução em que a informação é processada por um nó único com capacidade de processamento infinito, esta solução terá, além de uma maior complexidade de implementação, uma potencial aumento do tempo de processamento.

Latência da comunicação Num sistema real, a propagação da informação sensorial dos dispositivos móveis para os nós de processamento não será instantânea e será variável. Estas propriedades levam necessariamente a um aumento de latência na obtenção dos resultados finais e à necessidade de sincronizar a informação obtida (a qual poderá levar igualmente ao aumento da latência na obtenção do resultado final).

Faltas Num sistema real podem existir falta em várias componentes do sistema. A existência de faltas no sistema de comunicações poderá ser recuperada através da retransmissão das mensagens. Neste caso, a principal consequência será um aumento da latência na obtenção dos resultados finais. Caso não seja possível recuperar as mensagens perdidas, os resultados finais produzidos poderão ter uma qualidade inferior por resultarem dum menor número de amostras. As consequências deste facto dependerão do número de amostra para existentes para um dado fenómeno. As faltas nos nós de processamento deverão ser tratadas pelo sistema de processamento de informação sensorial, sendo de esperar que estas faltas poderão mesmo levar à ausência momentânea de resultados.

4 Modelo de processamento da informação sensorial

Para processar a informação sensorial, utilizamos o motor de processamento definido no sistema 4Sensing [6]. Este motor de processamento permite efectuar qualquer tipo de processamento, pelo que os resultados obtidos não são restringidos pelo modelo adoptado, mas apenas pelos algoritmos usados. Nas experiência

efectuadas, o processamento limita-se a funções de agregação simples, pelo que qualquer motor de processamento permitiria obter resultados idênticos.

4.1 Modelo de dados

No sistema 4Sensing, toda a informação é organizada segundo a forma de *tabela virtual*. Uma tabela virtual é inspirada no modelo de tabela numa base de dados relacional. No entanto, estão especialmente adaptadas a lidar com dados georeferenciados e com informação temporal. Assim, os dados numa tabela virtual são representados como um conjunto de pares (atributo, valor), devendo cada tuplo incluir um atributo temporal, i.e., um estampilha temporal relativa ao momento a que se referem, e um atributo espacial, na forma de uma coordenada física ou localização espacial.

As aplicações acedem à informação efectuando perguntas contínuas sobre as tabelas virtuais. Assim, uma pergunta sobre uma tabela virtual gera como resultado uma sequência de tuplos.

As tabelas virtuais são entidades lógica, não necessitando de ser materializadas em nenhum suporte de armazenamento. Uma tabela virtual refere informação produzida como resultado da aplicação dum conjunto de transformações ao dados dos sensores ou de outras tabelas virtuais. Assim, as tabelas virtuais definem a forma de produzir informação de nível superior a partir de informação mais elementar. esta aproximação pretende facilitar e promover a utilização dos dados de uma tabela virtual para diferentes computações.

4.2 Transformação dos dados

As computações são alcançadas através da execução de uma sequência de sucessivas operações. A partir das amostras obtidas pelos sensores, ou dos dados de outras tabelas virtuais, produzem-se novos dados pela aplicação de uma sucessão de operadores. As transformações dos dados incluem tipicamente *mapeamentos*, *agregações* e *detecção de condições específicas*.

As funções de mapeamento geralmente adicionam novos atributos aos dados, como adicionar a uma leitura GPS o identificador do segmento da estrada em que essa leitura foi efectuada. Em muitos casos, esta informação pode ser usada para particionar o processamento da informação, numa aproximação semelhante ao modelo *map-reduce*[10]. As funções de agregação combinam múltiplos tuplos em apenas um tuplo, geralmente com um modelo de dados diferente. Neste processo é comum usarem-se operadores estatísticos, como a *soma*, a *média*, etc. sobre os dados numa dada janela temporal. As funções de detecção de condições específicas geram novos tuplos indicativos que um evento relevante se verifica, como a detecção numa estrada congestionada ou a variação da velocidade média numa estrada.

Na Definição 1 apresenta-se uma especificação simplificada da tabela virtual *AverageSpeed*, usada nas experiências seguintes para computar a velocidade médias nos diferentes segmentos. Neste exemplo, a partir de leituras de velocidade média recolhidas pelos sensores dos dispositivo móveis, gera-se um fluxo periódico de tuplos *AverageSpeed* que incluem a velocidade média em cada segmento nos últimos 5 minutos. Para tal, os veículos comunicam, no fim da tra-

Definition 1 Especificação da tabela virtual AverageSpeed

```

sensorInput( SegmentSpeed )
globalAggregation {
  timeWindow(mode: periodic, size:300, slide:300)
  groupBy(['segmentId']){
    aggregate( AverageSpeed ) { SegmentSpeed s ->
      avg(s, 'sumSpeed', 'count', 'avgSpeed')
    } }
  } }
}

```

vessia de cada segmento, a velocidade agregada obtida por amostragem a cada 5 segundos. Esta velocidade agregada é discretizada em várias janelas (máximo 5) de 1 minuto. Para garantir que a disponibilidade de informação não é reduzida quando o trânsito num segmento está congestionado, caso o tempo de travessia exceda um valor esperado (inferido a partir da velocidade máxima no segmento) os veículos antecipam a comunicação da velocidade média.

Na tabela virtual as amostras de cada segmento são agrupadas numa janela de 5 minutos, produzindo-se a média das amostras para cada segmento. Como simplificação, não foram incluídas as operações de filtragem de leituras que excluem os dados fora da janela temporal e que garantem que são utilizadas apenas as leituras mais recentes de cada veículo.

5 Ambiente Experimental

O SUMO (Simulation of Urban MObility) [1] é um simulador de tráfego viário desenvolvido no Institute of Transportation Systems no German Aerospace Center. Neste trabalho, o SUMO foi usado para produzir uma simulação de tráfego realista usando o cenário de simulação TAPAS Cologne [2], que simula o tráfego na cidade alemã de Colónia entre as 6h00 e 8h00 a partir de informação sobre os hábitos de mobilidade dos seus habitantes e as infraestruturas disponíveis.

As simulações efectuadas usam traços de dados produzidos pelo SUMO para todos os veículos envolvidos na simulação. Estes traços são usados na simulação para produzir a informação sensorial dos veículos - os nós móveis recebem a cada 5 segundos informação de posicionamento e velocidade a partir dos traços SUMO. Estes dados são agregados em cada nó móvel antes de serem comunicados para um nó central, como descrito na secção 4.2.

6 Avaliação Experimental

Para avaliar a viabilidade dum sistema de sensoriamento participado é importante avaliar qual o grau de participação necessário para que o mesmo possa produzir a informação desejada. Para tal, nas experiências variou-se a percentagem de veículos que pertenciam ao sistema 4sensing (1%, 2%, 3%, 5%, 7% e 10%), i.e., que produziam amostras a ser processadas pelo sistema de sensoriamento. Todas as simulações foram efectuadas sob períodos de 30 minutos, usando

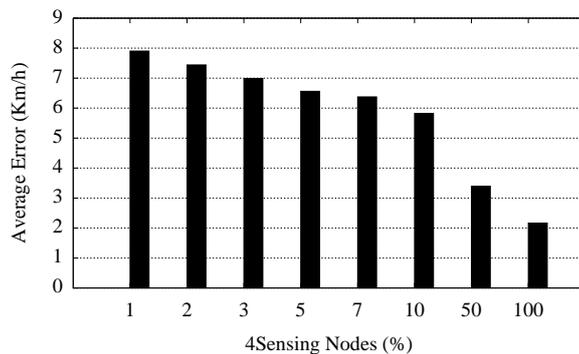


Figura 1: Erro médio relativo às estatísticas do SUMO

janelas de 5 minutos para a agregação de dados, excepto quando indicado em contrário.

6.1 Valores de referência

O SUMO produz diversas estatísticas por segmento de estrada, incluindo a velocidade média por período de tempo. Usando estas estatísticas base como uma medida das condições reais de trânsito, podemos determinar o erro médio introduzido por dois factores: a) apenas uma fracção dos veículos estão equipados com sensores; b) os diferentes processos usados para sensoriamento no SUMO e no 4sensing. A Figura 1 mostra o erro médio em Km/h, obtido por diferentes percentagens de veículos relativamente à referência do SUMO.

As seguintes secções apresentam o erro relativo a uma percentagem de 100% de veículos 4sensing, e não da referência do SUMO, i.e., o erro introduzido pelos diferentes processos de sensoriamento não é contabilizado.

6.2 Rácios de velocidade

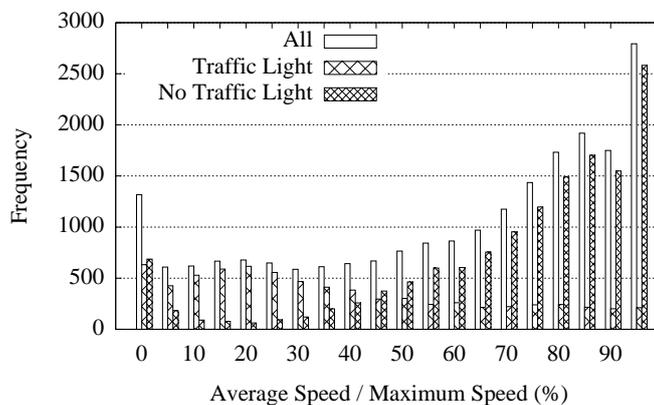


Figura 2: Ocorrência dos diferentes rácios de velocidade durante uma simulação - 100% veículos 4sensing

Para avaliar o estado do trânsito num dado intervalo, utiliza-se a relação entre a velocidade média observada e a velocidade máxima do segmento (dada

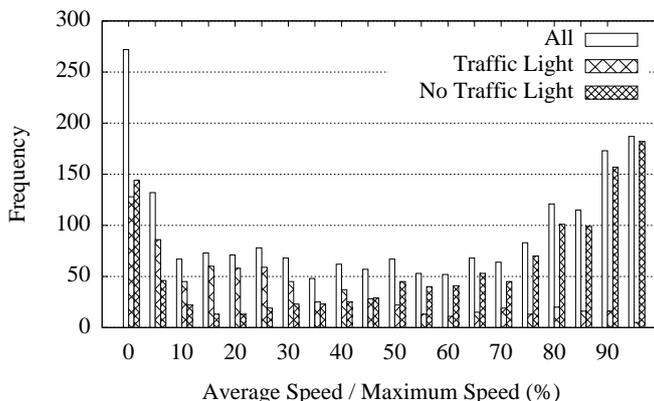


Figura 3: Ocorrência dos diferentes rácios de velocidade durante uma simulação - 1% veículos 4sensing

como uma propriedade estática da rede viária). Este método simples para medir o estado do trânsito num segmento permite-nos avaliar de forma simples a qualidade dos resultados produzidos pelo sistema de sensoriamento. Podemos assumir que rácios mais baixos são tipicamente uma indicação de situações de congestionamento. No entanto, deve-se ter em atenção que tal nem sempre é verdade em estradas com sinais de trânsito. As figuras 3 e 2 mostram a frequência com que ocorrem diferentes rácios de velocidade durante uma simulação, respectivamente para 100% e 1% de veículos. Estes rácios de velocidade são computados através das estatísticas do SUMO, sendo valores absolutos i.e., não são influenciados pela percentagem de veículos 4sensing. Os resultados mostram claramente uma diferente distribuição entre estadas com e sem sinais de trânsito, pelo que um sistema de sensoriamento deve ter este factor em consideração.

6.3 Erro Médio

A Figura 4 mostra a relação entre o rácio de velocidade e o erro médio em Km/h para a simulação. Os resultados da pergunta para cada segmento de estrada por janela temporal são agrupados de acordo com o rácio de velocidade, e o erro médio para cada grupo é computado (relativo a 100% de nós 4sensing). Os resultados mostram que o erro é menor nas situações em que a velocidade é muito baixa ou muito alta e que diminui com o número de amostras, o que seria de esperar.

6.4 Cobertura

Embora o erro médio possa dar uma ideia da qualidade dos resultados das perguntas sob as áreas onde existem dados, não permite perceber qual a cobertura dos dados disponíveis para a área definida pela pergunta. Para atender a este problema, uma métrica de cobertura foi definida, baseada na relevância relativa de cada segmento e considerando os padrões de trânsito reais. Esta relevância do segmento - referida como o seu *comprimento dinâmico* - é dada pelo número total de metros percorridos nesse segmento por todos os veículos durante a simulação, e é determinado pelo fluxo de trânsito e tamanho do segmento.

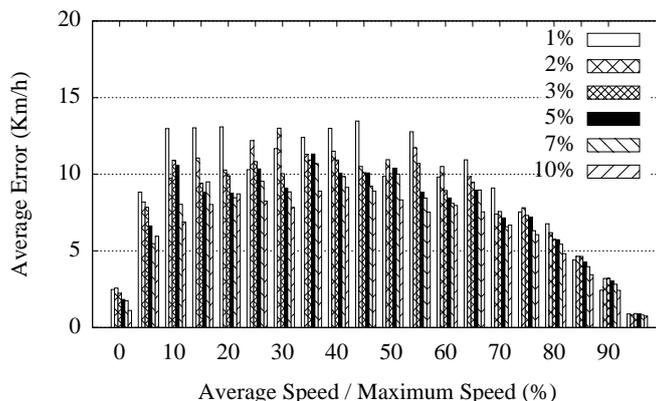


Figura 4: Relação entre o rácio de velocidades e o erro médio durante uma simulação

Ao adicionar o comprimento dinâmico a cada segmento da área da pergunta, obtemos a cobertura alvo - a cobertura esperada quando dados de todos os veículos estão disponíveis. A soma do comprimento dinâmico para cada segmento que seja parte dos resultados da pergunta devolve a cobertura real. A cobertura métrica discutida nesta secção é dada pela relação entre a cobertura actual e a alvo.

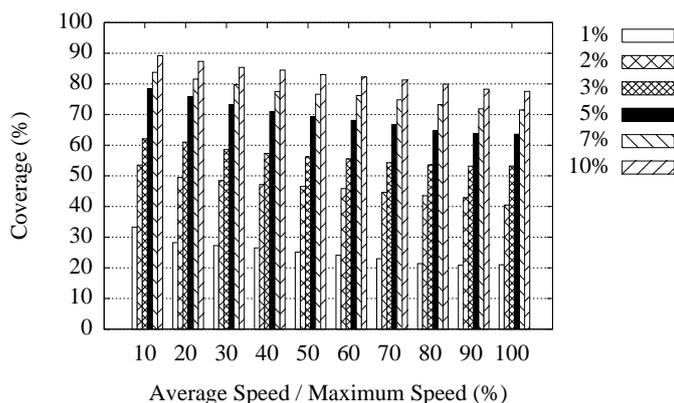


Figura 5: Rácio de cobertura vs rácio de velocidade - considerando todos os resultados

As figuras 5 e 7 mostram a relação entre os rácios de velocidade e a cobertura. Nestes gráficos, uma velocidade de, por exemplo 50%, representa todos os resultados de uma pergunta onde o rácio de velocidade é menor ou igual a 50%.

Na primeira figura, todos os resultados da pergunta são considerados válidos, enquanto que na segunda apenas os resultados que usam os dados de pelo menos dois veículos foram considerados. Em ambos os casos, os segmentos com taxas de velocidade mais baixos, onde existe maior probabilidade de haver congestionamento, mostram uma cobertura superior à dos segmentos onde o trânsito flui normalmente. A cobertura diminui quando consideramos resultados de pelo

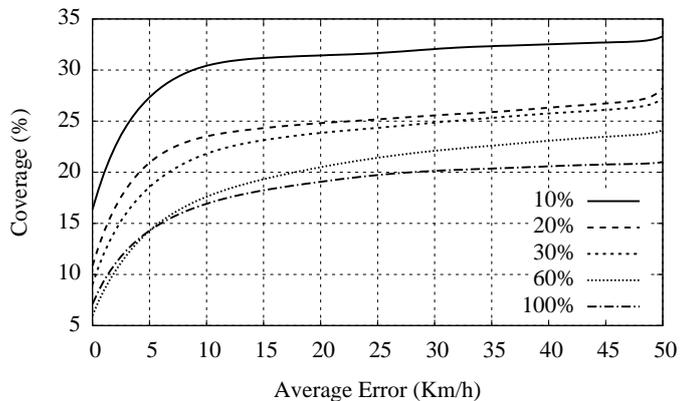


Figura 6: Erro médio vs rácio de cobertura - considerando todos os resultados

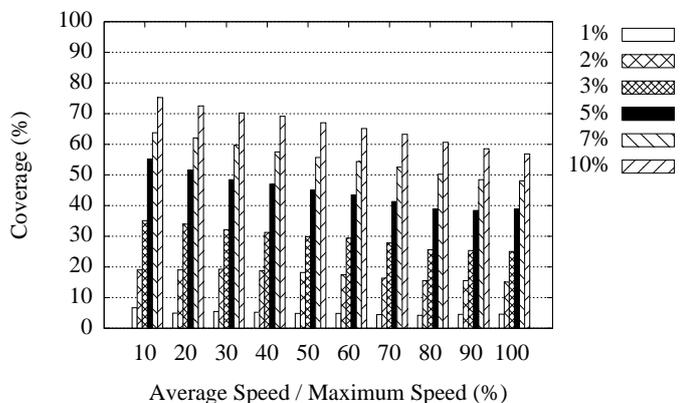


Figura 7: Rácio de cobertura vs rácio de velocidade - considerando resultados para dados obtidos de pelo menos dois veículos

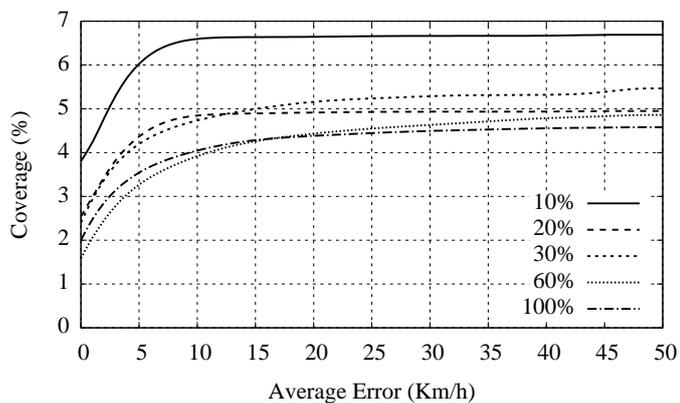


Figura 8: Erro médio vs rácio de cobertura - considerando resultados para dados obtidos de pelo menos dois veículos

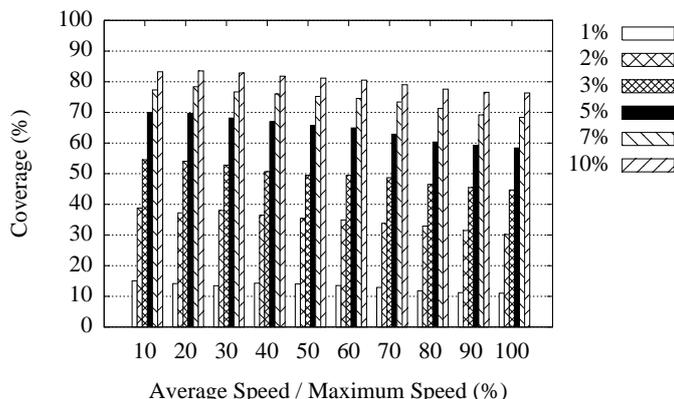


Figura 9: Rácio de cobertura vs rácio de velocidade - resultados para dados obtidos de pelo menos dois veículos, janela temporal de 10m

menos dois veículos - tal deve-se a que estradas com pouco movimento deixam de ser cobertas.

Nas figuras 6 e 8, os valores de cobertura são apresentados em relação ao erro médio, para um nível de participação de 1%. Como mencionado acima, na primeira figura todas os resultados são consideradas, enquanto que na segunda apenas são consideradas os resultados que usam dados de pelo menos dois veículos. Cada linha representa um rácio de velocidade particular. Por exemplo, para uma percentagem de velocidade igual ou menor a 10% podemos esperar uma cobertura de 30% com um erro médio inferior aproximadamente 10 Km/h. Estes resultados mostram que a cobertura é melhor para as situações em que a velocidade é mais baixa. É nessas situações que a cobertura também mais cresce rapidamente com o erro médio. Por outro lado, o melhor desempenho para velocidades mais baixas continua a verificar-se mesmo para níveis de participação superiores, como ilustra a figura 7.

A queda acentuada na cobertura, quando mais de um veículo é necessário para produzir um resultado, pode ser parcialmente compensado ao usar janelas temporais maiores para a agregação de dados. Isto pode ser observado na figura 9, que mostra a percentagem de cobertura quando são necessários dois veículos para produzir resultados válidos, e uma janela com o dobro do tamanho (10 minutos) da usada na figura 7.

7 Conclusões

Os resultados apresentados corroboram a ideia intuitiva existente que o modelo de sensoriamento participado tem um bom potencial para alcançar os objectivos a que se propõe. Em particular, realça-se que com um pequeno número de participantes no sistema é possível obter uma cobertura elevada - nas nossas experiências, com apenas 3% dos participantes é possível produzir uma cobertura de mais de 50%, subindo para 80% com uma participação de 10%.

No entanto, os resultados também mostram algumas direcções que um sistema de sensoriamento participado pode prosseguir de forma a ser mais eficiente. Primeiro, será interessante reduzir o número de amostras que cada utilizador

produz. No entanto, isto deve ser feito com cuidado para não reduzir a cobertura (como se mostra quando os resultados considerados apenas são produzidos com mais de uma amostra). Segundo, nem todas as amostras são interessantes - muitas vezes está-se interessado em detectar apenas situações anormais. Um sistema de sensoriamento deve privilegiar amostras produzidas nestas situações. A detecção de situações anormais é um problema complexo, porque depende do ambiente - por exemplo, os resultados mostram que o padrão de velocidades médias é diferente em estradas com e sem semáforos, sugerindo um tratamento diferenciado.

Referências

1. Simulation Of Urban Mobility (SUMO), June 2011. <http://goo.gl/28Taq>.
2. Tapas Cologne, June 2011. <http://goo.gl/ITB21>.
3. A. Campbell, S. Eisenman, N. Lane, E. Miluzzo, R. Peterson, H. Lu, X. Zheng, M. Musolesi, K. Fodor, and G.-S. Ahn. The rise of people-centric sensing. *Internet Computing, IEEE*, 12(4):12–21, July-Aug. 2008.
4. D. Cuff, M. Hansen, and J. Kang. Urban sensing: out of the woods. *Commun. ACM*, 51(3):24–33, 2008.
5. J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan. The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. In *MobiSys '08: Proceeding of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 29–39, New York, NY, USA, 2008. ACM.
6. H. Ferreira, S. Duarte, and N. M. Preguiça. 4sensing – decentralized processing for participatory sensing data. In *Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems, ICPADS 2010*, pages 306–313. IEEE, 2010.
7. S. Gaonkar, J. Li, R. R. Choudhury, L. Cox, and A. Schmidt. Micro-blog: sharing and querying content through mobile phones and social participation. In *MobiSys '08: Proceeding of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 174–186, New York, NY, USA, 2008. ACM.
8. P. Gibbons, B. Karp, Y. Ke, S. Nath, and S. Seshan. Irisnet: an architecture for a worldwide sensor web. *Pervasive Computing, IEEE*, 2(4):22–33, Oct.-Dec. 2003.
9. B. Hull, V. Bychkovsky, Y. Zhang, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, E. Shih, H. Balakrishnan, and S. Madden. Cartel: a distributed mobile sensor computing system. In *SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 125–138, New York, NY, USA, 2006. ACM.
10. D. Jeffrey and S. Ghemawat. Mapreduce: Simplified data processing on large clusters. In *Proc. of the 6th OSDI*, pages 137–150, December 2004.
11. E. Miluzzo, N. D. Lane, K. Fodor, R. Peterson, H. Lu, M. Musolesi, S. B. Eisenman, X. Zheng, and A. T. Campbell. Sensing meets mobile social networks: the design, implementation and evaluation of the cenceme application. In *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pages 337–350. ACM, 2008.
12. P. Mohan, V. N. Padmanabhan, and R. Ramjee. Nericell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones. In *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pages 323–336, New York, NY, USA, 2008. ACM.