
IBISC
UNIVERSITE D'EVRY
40, RUE DU PELVOUX – CE 1455
91020 EVRY CEDEX

Le 22 novembre 2014

Le mémoire de Monsieur Frédéric Bousefsaf est intitulé : « Mesure sans contact de l'activité cardiaque par analyse du flux vidéo issu d'une caméra numérique. Extraction des paramètres physiologiques et application à l'estimation du stress ».

Les travaux de la thèse se situent dans le contexte de l'ingénierie biomédicale, plus précisément du traitement de signal et des images pour extraire des signaux physiologiques. Le stress de la personne est ensuite évalué à partir de ces mesures. Le stress, considéré comme le mal du siècle, est défini comme un état réactionnel de l'organisme soumis à une agression brusque. La vulnérabilité au stress varie beaucoup d'une personne à une autre. Une évaluation fine et sans contact de l'état de stress permettrait d'adapter le traitement à la personne. Dans ce contexte, la principale difficulté des systèmes d'imagerie est de rendre l'extraction des données physiologiques, robustes aux variations d'illumination et aux mouvements de tête pouvant générer des artefacts importants.

Le mémoire est organisé en trois chapitres, une introduction générale et, une conclusion et perspectives. Le document est bien rédigé. L'état de l'art est conséquent. Des résumés en fin de chapitre et à l'intérieur du chapitre, quand celui-ci est un peu long, mettent en évidence les éléments jugés importants. Chaque chaîne de traitements complexe est introduite par une explication synthétique suivie de développement concernant chaque module.

Remarques par chapitre

Le deuxième chapitre effectue un état de l'art sur la reconnaissance automatique du stress basée sur des données physiologiques. Il aborde tout d'abord la description des signaux physiologiques utilisés pour la reconnaissance des émotions ou de stress ainsi que les technologies et méthodes permettant de les extraire. Le deuxième volet est consacré à la quantification de l'état de stress.

Le chapitre, riche en information, est étayé par un nombre conséquent de références. Il aurait mérité pour aider à la compréhension, une introduction décrivant de manière plus détaillée le contenu. Et surtout, en fin de première et dernière parties, un tableau récapitulatif permettant de comparer les différentes technologies et méthodes proposées dans la littérature en précisant leurs limites. L'objectif étant de déterminer les problèmes non résolus sur lesquels faire porter les efforts. Les paragraphes traitant de l'activité cardiaque soulignent que les travaux autour des technologies sans contact sont récents et toujours d'actualité. Cette étude indique en ce qui concerne les caméras dans le spectre visible les difficultés à rendre robuste les algorithmes aux mouvements de la tête et aux variations de l'éclairage ambiant. Comme cette technologie est utilisée par la suite, il aurait été intéressant de récapituler les problèmes résolus ainsi que

ceux qui restent ouverts afin de justifier les choix opérés dans le chapitre suivant. Il en est de même, dans une moindre mesure, pour la respiration et la saturation pulsée en oxygène.

Le deuxième point abordé dans ce chapitre concerne la quantification du stress. La courte introduction sur le rôle du système nerveux est claire et étayée par des tableaux justifiant l'intérêt des mesures décrites précédemment. Il n'en est pas de même pour l'explication qui tente de différencier stress et émotion, et reste assez floue. La suite introduit les techniques qui permettent de reconnaître et de quantifier les états de stress. Le paragraphe sur la reconnaissance de stress basée sur plusieurs sources aurait mérité d'être plus développer. Notamment les méthodes de classification de caractéristiques, sachant que l'auteur allait être amené à les utiliser au chapitre 4. Même si dans les faits, cet aspect n'a été qu'effleuré.

Les quelques remarques de ce paragraphe ne doivent pas occulter le travail conséquent et très instructif réalisé.

Le troisième chapitre est conséquent. Plusieurs contributions y sont décrites. La première est la mesure de la fréquence cardiaque instantanée à l'aide d'une webcam. La difficulté rencontrée, au début du chapitre, est que l'auteur n'ayant pas précisé ses objectifs en se positionnant par rapport à l'état de l'art, le lecteur ne voit pas les raisons de développer une nouvelle méthode. De plus, comme l'un des objectifs est la robustesse aux mouvements de la tête, il aurait fallu préciser les mouvements visés ainsi que leur amplitude, toujours en se situant par rapport à des références qui invoquaient des ambitions similaires.

Le chapitre débute en décrivant la chaîne de prétraitements aboutissant à l'extraction du signal photopléthysmographique (PPG). Après avoir détecté à l'aide d'un algorithme existant le visage, les paramètres de la webcam sont automatiquement réglés pour s'adapter aux variations de l'éclairage ambiant. Pour ce faire l'auteur procède à un premier changement d'espace colorimétrique calculé à partir de l'espace originel RGB, les paramètres de réglage de la caméra ayant un effet direct sur ces trois nouvelles composantes. Puis la détection de la peau repose sur un masque qui isole les pixels de la peau par un seuillage après un nouveau changement d'espace colorimétrique. Cette transformation est justifiée par une référence citée par l'auteur. Enfin le signal PPG est extrait après un troisième changement d'espace colorimétrique motivée par la plage de longueurs d'onde absorbées par la molécule d'hémoglobine et une explication plus obscure reposant sur certaines caractéristiques de la perception humaine. A chaque trame un scalaire est calculé par moyennage spatiale de la nouvelle composante u^* , limitée à la région active du masque. Une comparaison qualitative montre l'apport, en termes de robustesse, de la détection de peau et du choix de la composante u^* de ce nouvel espace versus la composante verte de l'espace RGB utilisé dans la littérature. En complément du signal PPG, un indice de confiance permet de détecter les instants pendant lesquels ce signal n'est pas utilisable. La formule pour calculer l'indice de confiance mériterait d'être mieux expliquée, même si l'indice n'est pas utilisé par la suite. L'existence de cet indice participe à la robustesse de l'algorithme mais pose la question de l'absence de signal pendant des instants de durée variable.

Le chapitre se poursuit avec la mesure de la fréquence cardiaque à partir du signal PPG en appliquant la transformée en ondelettes continue pour éliminer les tendances basses fréquences et les bruits hautes fréquences. L'idée étant de définir avec précision les extrema

de l'onde cardiaque, la transformée inverse de la représentation en ondelettes filtrée est calculée pour reconstruire le signal lissé PPG. De ce signal, l'auteur mesure la fréquence instantanée à partir de l'intervalle entre deux maxima. L'auteur évoque la présence d'artefacts dus aux deux causes déjà citées, mais de façon surprenante, limite le traitement à l'application d'heuristiques.

Une autre mesure est effectuée sur le signal PPG, celle du rythme respiratoire à partir de la variabilité cardiaque. Le principe revient à réaliser un filtre passe-bande à partir d'une transformée en ondelettes continue en se bornant à une bande de fréquences correspondant à celle de la respiration. Une comparaison avec un capteur en contact avec l'abdomen montre que les fréquences mesurées sont proches.

Le chapitre se termine par deux études expérimentales. La première vise d'une part à comparer la précision de ces mesures par rapport à celles effectuées par des capteurs de référence avec contact et, d'autre part, à montrer la robustesse des algorithmes à des mouvements de tête qui parasitent le signal. Une analyse statistique couplée au calcul des coefficients de Pearson ainsi qu'aux tracés de Bland-Altman montre que les résultats obtenus par le capteur sans contact sont proches de ceux obtenus avec contact même en présence de mouvements de la tête. Ceci est vrai pour le rythme cardiaque mais moins probant pour la fréquence respiratoire pour laquelle les limites de concordance du tracé de Bland-Alman restent assez élevées par rapport à la fréquence moyenne. Le choix du tracé de Bland-Alman pour comparer la mesure d'une même grandeur par deux dispositifs différents est pertinent mais il aurait été plus intéressant de calculer la précision plutôt que le biais dont les différences tantôt positives, tantôt négatives peuvent se compenser. En ce qui concerne la méthode de Pearson, la comparaison battement par battement pose la question de la différence de fréquences d'échantillonnage entre les deux capteurs et donc de synchronisation des données. Ce point n'a pas été soulevé par l'auteur.

La deuxième étude expérimentale a pour but d'évaluer la capacité du capteur sans contact à mesurer les évolutions de l'intensité de la composante pulsatile du signal PPG. L'auteur le montre par comparaison avec un capteur sans contact en utilisant les mêmes outils d'analyse que dans l'étude précédente, avec la réserve que la méthode sans contact reste, tout de même, sensible aux variations d'éclairage et aux mouvements de la tête.

Le chapitre quatre propose une méthode d'estimation du niveau de stress à partir des mesures physiologiques effectuées par la caméra. L'avantage du capteur sans contact est d'être peu invasif. La première partie du chapitre présente les étapes qui transforment les signaux physiologiques mesurés en une courbe de stress. La combinaison des deux paramètres, rythme cardiaque instantané et amplitude du signal PPG, retenus pour former la courbe de stress consiste en une somme après normalisation des signaux. Une évaluation expérimentale comportant une alternance de phases de stress et de relaxation montre que la courbe de stress permet de discriminer ces deux états comme le souligne clairement le graphe de discrimination. L'auteur effectue de nouveau une comparaison avec un capteur sans contact de référence qui mesure l'activité électrodermale en utilisant les mêmes outils d'analyse que précédemment. Les résultats montrent un niveau de concordance satisfaisant entre les courbes de stress émanant de la webcam et du capteur avec contact. Une des questions qui vient à

l'esprit à l'issue de cette évaluation est la capacité de l'approche à quantifier plus finement l'état de stress.

Dans la conclusion et les perspectives, l'auteur décrit les principales contributions. Il analyse de façon honnête les limites du système qu'il a développé en proposant des pistes pour les repousser. Ces propositions soulignent sa bonne maîtrise du domaine et le recul qu'il a su prendre par rapport à sa problématique.

En conclusion, Monsieur Frédéric Bousefsaf a mené un travail de qualité, complet et conséquent. Il a développé, soit en concevant soit en adaptant des algorithmes, une chaîne complète de traitements partant du capteur jusqu'à une classification binaire de l'état de stress. La démarche suivie est rigoureuse et les résultats sont convaincants. Il est à noter qu'il a réalisé trois évaluations expérimentales pour comparer son dispositif avec des systèmes de référence, ce qui est très chronophage et toujours complexe à mettre en oeuvre.

Le mémoire est structuré, bien rédigé et clair.

Les travaux ont donné lieu à une production scientifique importante : trois revues internationales dont deux à facteur d'impact, une conférence internationale et une conférence nationale à comité de lecture scientifique, dans tous les cas en premier auteur.

J'estime que le mémoire et les travaux de Monsieur Frédéric Bousefsaf traduisent une très bonne maîtrise du domaine du traitement de signal et d'images d'origine physiologique.

Je donne un avis très favorable à la soutenance de cette thèse en vue de l'obtention du titre de docteur de l'Université de Lorraine, discipline génie informatique, automatique et traitement du signal.

Etienne Colle
Professeur des Universités

