

Modélisation de l'impact de la vitesse des nœuds sur l'estimation des distances dans les Réseaux Corporels sans fils avec ULB

Arturo GUIZAR, Claire GOURSAUD and Jean-Marie GORCE

University of Lyon, INRIA
INSA Lyon, CITI-INRIA, F-69621, Lyon, France

{arturo.guizar, claire.goursaud, jean-marie.gorce}@insa-lyon.fr

Résumé – Le but de cet article est d'évaluer l'impact de la vitesse des nœuds sur l'erreur de positionnement dans les applications de localisation pour un réseau corporel sans fil. En effet, la distance de nœuds est estimée grâce à l'envoi de trois paquets définis par le protocole '3-Way Ranging'. Cependant, la distance entre capteurs placés sur le corps peut être impactée par les mouvements de la personne. Dans ce papier, nous commençons par examiner de manière théorique l'erreur d'estimation de distances avec le protocole '3-Way Ranging', en se basant sur un canal parfait, une couche MAC TDMA et une couche physique en Ultra Large Bande. Les résultats confirment que l'erreur sur les distances et positions est fortement corrélée avec la vitesse des nœuds.

Abstract – In this paper, we aim to evaluate the impact of node speed on the positioning error with a Wireless Body Area Network (WBAN). In fact, the node position is estimated with the transmission of three packets defined by the protocol '3-Way Ranging'. However, the distance between the sensors placed on the body can be affected by the human mobility. Thus, we study theoretically the distance estimation error with the protocol '3-Way Ranging', based on a perfect channel, a TDMA MAC layer and a Physical layer based on Ultra Wide Band (as defined by the standard IEEE 802.15.6). The results confirm that the distance and positioning error follows a big correlation with the node speed.

1 Introduction

Les Réseaux Corporels sans fil (WBAN) réfèrent à un groupe de nœuds embarqués sur une personne. Ces nœuds communiquent entre eux pour des applications diverses, e.g. l'analyse sportive, la télémédecine ou la sécurité civile [1]. Dans ce contexte, les techniques de radio-localisation sont très étudiées, car il existe un fort intérêt pour l'analyse du mouvement du corps. Ceci est possible, entre autres, par la transmission de pulses en Ultra Large Bande (IR-ULB) [2]. La haute résolution temporelle de ces pulses permet de calculer la distance entre deux nœuds en estimant le Temps de Vol de 3 paquets définis par le protocole Three Way Ranging (3-WR). Plusieurs travaux ont abordé le problème de localisation, notamment pour compenser la désynchronisation des horloges et les effets du canal [3]. Or, la plupart des études proposent des solutions pour des Réseaux de Capteurs statiques ou faiblement mobiles (WSN). A l'inverse, dans un WBAN, les nœuds étant mobiles, les distances mesurées varient au cours du protocole 3-WR, induisant des erreurs sur leur estimation (Fig. 1).

Dans cet article, nous analysons l'impact de la vitesse sur l'estimation de la position. Pour cela, nous proposons un modèle théorique qui prend en compte cet impact. Puis, pour un scénario d'ordonnancement des paquets 3-WR, nous évaluons les erreurs de positionnement avec un modèle de mobilité réaliste. Nos résultats montrent une corrélation entre le type de mouvement réalisé (donc de la vitesse des nœuds) et l'erreur sur l'estimation de position.

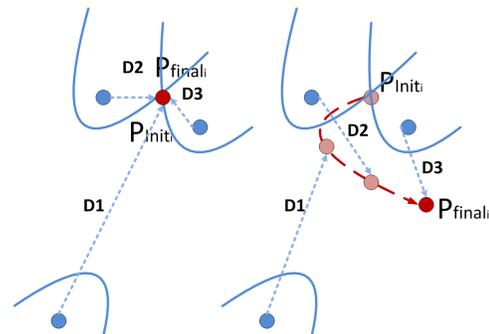


FIGURE 1 – Erreur sur l'estimation de distances entre un nœud statique et un nœud mobile

2 Modélisation du système

2.1 Topologie du réseau

Dans ce travail, nous considérons un réseau corporel sans fil embarqué sur une personne dans un environnement indoor, tel que défini dans la Section 2.3. Ce réseau est complètement maillé et tous les nœuds (N_t) peuvent communiquer directement deux à deux. Nous utilisons une couche physique basée sur des pulses à Ultra Large Bande (ULB). Le réseau est caractérisé par deux types de capteurs : les *nœuds ancrés* qui ont la connaissance parfaite de leur position à tout moment et les *nœuds mobiles* qui souhaitent estimer leur position. Les ancrés forment un Système de Coordonnées Locales (LCS) associé au corps, qui

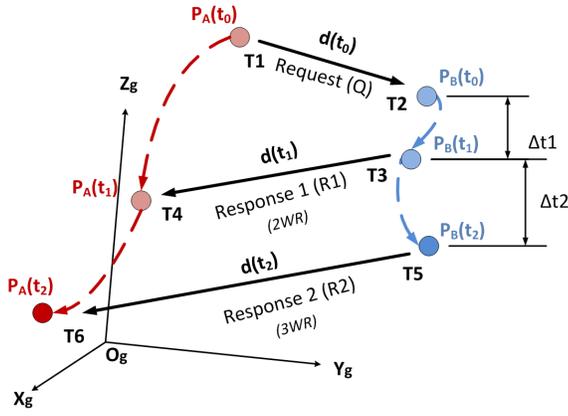


FIGURE 2 – Protocole Three Way Ranging

est mobile dans le Système de Coordonnées Globales (GCS). Pour réaliser la localisation, un nœud i doit pouvoir estimer sa distance avec une ancre j , notée $\hat{d}_{ij}(t)$, pour ensuite estimer sa position $\hat{P}_i(t)$.

2.2 Estimation de distance avec le protocole 3WR

La distance entre un nœud ancre et un nœud mobile est évaluée avec l'estimation du temps d'arrivée (ToA) des paquets envoyés à trois instants différents (Fig. 2), tel que défini par le protocole 3-WR [2] :

i) A l'instant t_0 , le nœud i envoie un paquet Requête Q_{ij} à l'ancre j .

ii) A l'instant t_1 , l'ancre j répond avec un paquet Réponse 1 ($R1_{ji}$). Ainsi, le nœud i est en mesure d'estimer le temps de vol et par conséquent une première estimation de leur distance.

iii) Finalement, à l'instant t_2 , l'ancre j envoie un paquet Réponse 2 ($R2_{ji}$). Ce dernier paquet permet aux nœuds, avec des horloges non synchronisées, d'évaluer et compenser la dérive d'horloge. Cette bonne précision temporelle permet de réduire l'erreur sur l'estimation de la distance.

A partir de ces transactions, nous définissons par $T1$, $T3$ et $T5$ les instants où les nœuds transmettent les paquets Q_{ij} , $R1_{ji}$ et $R2_{ji}$ respectivement. De même, nous notons $T2$, $T4$ et $T6$ les temps d'arrivée des ces mêmes paquets respectivement. Ainsi, la distance $\hat{d}_{ij}(t)$ est évaluée avec l'équation (1) :

$$\hat{d}_{ij}(t) = \frac{1}{2}c [((T_4 - T_1) - \Delta t1) - ((T_6 - T_4) - \Delta t2)] \quad (1)$$

où c représente la vitesse de transmission des pulses (i.e. $c = 3 * 10^8 m/s$) et $\Delta t1$ (resp. $\Delta t2$) est égal à $(T_3 - T_2)$ (resp. $(T_5 - T_3)$).

2.3 Modèle de mobilité

Dans cette étude, nous prenons en considération un modèle d'activité de Yoga réaliste, obtenu par mesure. Les traces utilisées ont été obtenues lors de la campagne de mesures du pro-

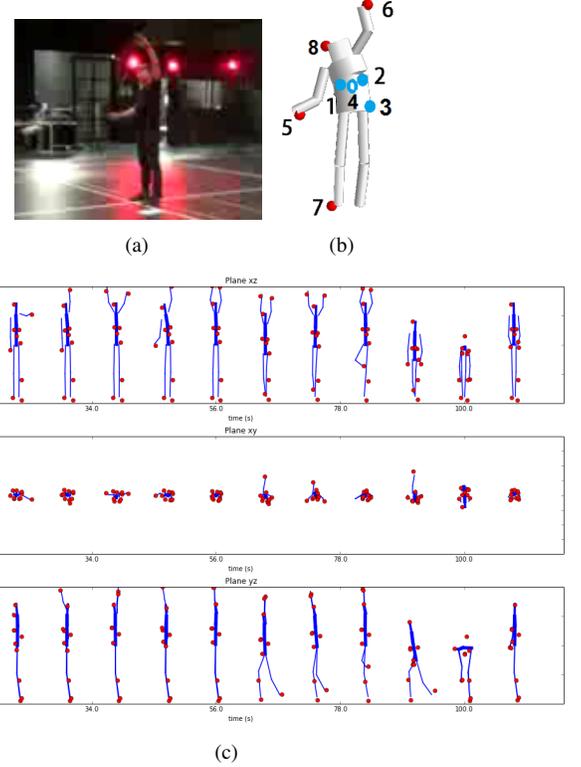


FIGURE 3 – (a) Enregistrement des postures du scénario Yoga (b) Reconstruction Multi-cylindrique du corps - les points rouges (resp. bleus) représentent les nœuds mobiles (resp. ancrés). (c) Décomposition du Modèle de Mobilité avec le simulateur PyLayers

jet CORMORAN effectuée au laboratoire M2S de l'ENS Cachan, Bretagne, France en Juin 2014. Ce modèle a été généré grâce à un système de capture du mouvement (Vicon [6]) basé sur la technologie infrarouge à une fréquence de $100Hz$. Pour cela, nous avons déployé 16 caméras dans un espace confiné de $10 \times 6 m^2$. Nous avons extrait de ces données la position et la vitesse instantanée de chaque nœud. Nous avons injecté ces données réalistes dans nos simulations, afin d'évaluer l'impact de la vitesse réelle sur l'estimation des positions.

Nous considérons un scénario où la personne enchaîne des positions de Yoga. L'intérêt de ce scénario est que l'alternance de présence ou d'absence de mouvement permet de séparer l'impact de la vitesse des autres facteurs d'erreur sur la précision. La série de positions statiques (imitant des postures de yoga (e.g., mettre les deux pieds ensemble et les mains sur les côtés du corps, etc.)) est réalisée au même endroit, donc seuls les membres bougent par rapport au corps (Fig. 3(c)), et les repères LCS et GCS sont confondus. Nous considérons que le réseau est composé de quatre ancrés et quatre nœuds mobiles, comme représenté sur la Figure 3(b). Les ancrés sont positionnés sur les parties statiques du corps : côté droit du torse (A1), côté gauche du torse (A2), hanche gauche (A3) et dos (A4). Les nœuds mobiles sont positionnés sur le bras droit (N5), le bras gauche (N6), le pied droit (N7) et la tête (N8).

3 Proposition et résultats

3.1 Modélisation théorique

Le modèle défini dans la Section 2.2 a été proposé à l'origine pour l'estimation de distance entre des nœuds statiques ou très peu mobiles. Or, une forte mobilité impacte l'estimation réalisée de la distance $\hat{d}_{ij}(t)$. En effet, les distances réellement parcourues par les 3 différents paquets ne sont plus les mêmes, et influent sur les temps de vol observés. Nous avons montré que la couche MAC et les stratégies associées à l'ordonnement de paquets 3-WR jouent un rôle important pour l'estimation des positions [4]. En particulier, la précision des distances estimées dépend des durées $\Delta t1$ et $\Delta t2$. En effet, plus ces délais augmentent, plus les nœuds se déplacent entre les instants t_0 et t_2 , ceci s'accroissant pour des vitesses élevées.

Dans cette étude, nous voulons quantifier cet impact. Pour cela, nous considérons un repère cartésien 3D (O_g, x_g, y_g, z_g). Soit $\vec{P}(t) = \overrightarrow{OgP}$, le vecteur position entre le point d'origine et la position d'un nœud à l'instant t . Notons $\vec{d}_{ij}(t) = \vec{P}_j(t) - \vec{P}_i(t)$ le vecteur distance entre i et j lors de l'envoi d'un paquet 3-WR (Q_{ij} , $R1_{ji}$ et $R2_{ji}$) à un instant donné (t_0 , t_1 ou t_2).

Remarque 1 La norme du vecteur distance s'exprime en fonction de la vitesse de propagation d'un pulse ULB, tel que :

$\|\vec{d}_{ij}(t)\| = c * (T_{Rj} - T_{Ei})$, où T_{Ei} et T_{Rj} représentent les instants d'émission par le nœud i et de réception par j d'un paquet à l'instant t .

Cette proposition est vraie si on suppose que la vitesse du nœud ($< 10m/s$) est très inférieure par rapport à celle du pulse (c). Ainsi, l'équation (1) peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \hat{d}_{ij}(t) &= \frac{1}{2}c [((T_4 - T_3) + (T_2 - T_1)) - ((T_6 - T_5) - (T_4 - T_3))] \\ \hat{d}_{ij}(t) &= \frac{1}{2} [(\|\vec{d}_{ij}(t_1)\| + \|\vec{d}_{ij}(t_0)\|) - (\|\vec{d}_{ij}(t_2)\| - \|\vec{d}_{ij}(t_1)\|)] \\ \hat{d}_{ij}(t) &= \frac{1}{2} [(\|\vec{d}_{ij}(t_0)\| + 2\|\vec{d}_{ij}(t_1)\| - \|\vec{d}_{ij}(t_2)\|)] \quad (2) \end{aligned}$$

Nous cherchons à exprimer $\hat{d}_{ij}(t)$ en fonction de la vitesse des nœuds et de la distance initiale $\vec{d}_{ij}(t_0) = \vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0)$. Au cours de la transaction 3-WR, la distance est impactée par deux déplacements différents ($t_0 \Rightarrow t_1$ et $t_1 \Rightarrow t_2$).

Soit $\vec{V}_i(t) = \frac{\vec{P}_i(t) - \vec{P}_i(t-1)}{\delta t}$, la vitesse moyenne du nœud i à l'instant t . Suite au premier déplacement, nous pouvons décomposer le vecteur distance $\vec{d}_{ij}(t_1)$ grâce à la relation de Chasles ($\vec{AD} = \vec{AB} + \vec{BC} - \vec{DC}$), t.q. :

$$\begin{aligned} (\vec{P}_j(t_1) - \vec{P}_i(t_1)) &= (\vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0)) - (\vec{P}_i(t_1) - \vec{P}_i(t_0)) \\ &\quad + (\vec{P}_j(t_1) - \vec{P}_j(t_0)) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) &= \vec{d}_{ij}(t_0) - \vec{V}_i(t_1)(T_4 - T_1) + \vec{V}_j(t_1)\Delta t1 \end{aligned}$$

En procédant de même pour $\vec{d}_{ij}(t_2)$, on obtient le système d'équations à trois inconnues suivant :

$$\begin{aligned} \vec{d}_{ij}(t_0) &= \vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) &= \vec{d}_{ij}(t_0) - \vec{V}_i(t_1)(T_4 - T_1) + \vec{V}_j(t_1)\Delta t1 \quad (3) \\ \vec{d}_{ij}(t_2) &= \vec{d}_{ij}(t_1) - \vec{V}_i(t_2)(T_6 - T_4) + \vec{V}_j(t_2)\Delta t2 \end{aligned}$$

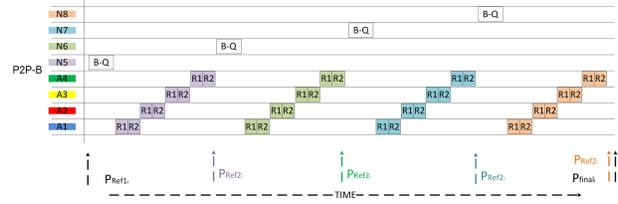


FIGURE 4 – Détail sur l'algorithme P2P-B

Or, d'après la *Remarque 1*, nous pouvons écrire $T_4 - T_1 = (T_4 - T_3) + T_3 - T_2 + (T_2 - T_1) \simeq \Delta t1$ car l'on considère que les déplacements des nœuds entre ($T_4 - T_3$) et ($T_2 - T_1$) sont négligeables. De même, nous avons $T_6 - T_4 \simeq \Delta t2$. Le système d'équations devient :

$$\begin{aligned} \vec{d}_{ij}(t_0) &= \vec{P}_j(t_0) - \vec{P}_i(t_0) \\ \vec{d}_{ij}(t_1) &= \vec{d}_{ij}(t_0) - (\vec{V}_i(t_1) - \vec{V}_j(t_1))\Delta t1 \\ \vec{d}_{ij}(t_2) &= \vec{d}_{ij}(t_1) - (\vec{V}_i(t_2) - \vec{V}_j(t_2))\Delta t2 \end{aligned} \quad (4)$$

Nous étudions ici uniquement l'impact de la vitesse sur la précision de localisation. Nous considérons donc un canal parfait et ignorons les effets de masquage liés au corps et l'influence des multi-trajets. $\Delta t1$ et $\Delta t2$ sont fixés par l'ordonnement au niveau MAC.

3.2 Protocole d'ordonnement MAC

Pour un positionnement dans un espace à trois dimensions, le nœud estime sa distance avec m ancres, puis calcule sa position avec un algorithme de positionnement (TDOA, $m \geq 4$) [2]. La trame contient les slots nécessaires à la localisation individuelle de tous les nœuds mobiles (n). Nous avons choisi de valider notre analyse théorique avec l'exemple d'une stratégie nœud par nœud (P2P-B) (Fig. 4). Un nœud i émet un paquet Requête Q_{ij} en Broadcast à tous les ancres. Puis, à leur tour, chaque ancre envoie deux réponses ($R1_{ji}$) et ($R2_{ji}$) consécutivement. Ainsi, la trame est constituée de n paquets Q_{ij} , $n * m$ paquets $R1_{ji}$ et $n * m$ paquets $R2_{ji}$ (toujours dans le même ordre). Ainsi, nous avons $\Pi_{P2P-B} = n * (2m + 1)$ paquets pour P2P-B. La diffusion des demandes a pour effet d'augmenter le retard $\Delta t1$ pour certaines ancres. Par ailleurs, ce retard dépend de l'ancre et du nœud concerné, mais est invariant dans le temps puisque la structure des trames est toujours la même.

3.3 Outils de simulation

Nous utilisons le simulateur à événements discrets WSNet [5], adapté à notre cas d'étude. En particulier, nous avons implémenté une couche physique basée sur le standard IEEE802.15.6 en ULB en mode par défaut (modulation OOK et 0,4875 Mbps). Au niveau MAC, nous avons utilisé un protocole basé sur TDMA, ainsi que l'algorithme P2P-B, détaillée dans la section 3.2. Enfin, nous avons mis en place un modèle de mobilité qui permet d'exploiter les traces acquises au cours du projet MORAN, comme détaillé dans la section 2.3.

3.4 Impact de la vitesse sur les erreurs

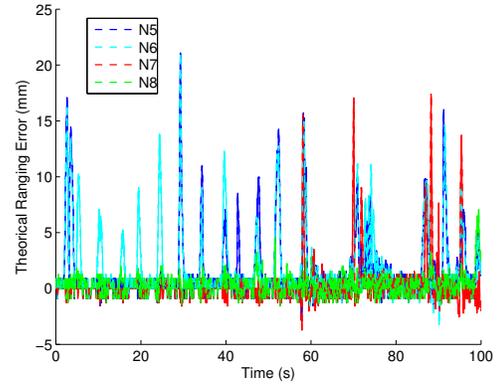
Notre modèle théorique permet d’obtenir l’écart entre la distance en début de trame et la distance estimée. Nous l’avons appliqué aux 100s de données d’acquisition du mouvement. La résolution temporelle des données exploitées est celle des caméras Vicon (un point de mesure toutes les 10ms). Or, dans notre scénario, P2P-B présente une durée de trame de $\approx 54ms$. En conséquence, les distances sont mises à jour 5 fois au cours de la trame, ce qui est suffisant pour connaître l’évolution entre les distances $\vec{d}_{ij}(t_0)$, $\vec{d}_{ij}(t_1)$ et $\vec{d}_{ij}(t_2)$ en fonction de la vitesse lors du calcul d’une position.

Nous présentons sur la Figure 5(a), l’erreur théorique sur les distances entre les nœuds mobiles et l’ancre 4 (pire cas). Cette erreur suit l’évolution de la vitesse (non présentée ici). Mais, on visualise facilement les périodes statiques (où tous les nœuds ont une vitesse (donc une erreur) très faible), et les périodes d’activités (où au moins un nœud se déplace). Cependant, les nœuds ne sont pas tous en mouvement simultanément, seules les mains (N_5 et N_6) sont toujours actives. On retrouve sur cette figure les trois périodes principales d’activités représentées sur la Figure 3(c) : Sb1 (0 – 50s), Sb2 (50 – 80s) et Sb3 (80 – 100s). Pour Sb1, le porteur a levé et baissé plusieurs fois les deux mains au dessus de sa tête. En conséquence, ce sont les nœuds des mains qui subissent le plus d’erreur (-0.1 à $2.2cm$) en fonction des postures réalisées (Half moon et Mountain poses) ; tandis que les nœuds du pied (N_7) et de la tête (N_8) restent quasi-statiques (-0.4 à 0.3 cm). On peut noter que l’erreur maximum reste limitée par rapport à l’amplitude du mouvement ($\approx 2m$). Pour Sb2, la personne réalise un étirement des jambes (Warrior pose), ce qui se traduit par une erreur sur l’estimation de N_7 . On peut noter que, dans cette phase, le nœud du pied s’éloigne des ancrs. Finalement, pour Sb3, la personne se penche en avant pour toucher ses pieds avec ses mains (bend forward pose), ce qui explique l’erreur pour le nœud N_8 posé sur la tête (-0.2 à $0.8cm$). Ici, les nœuds mobiles se rapprochent des ancrs. Nous avons pu constater en exploitant les données de vitesse, que, pour une même vitesse, deux nœuds allant en directions opposées subissaient la même erreur.

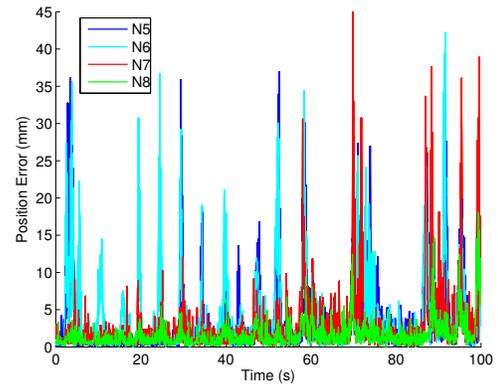
Pour compléter l’étude, nous avons aussi estimé par simulation l’erreur sur les positions estimées (Figure 5(b)). Nous pouvons observer la forte corrélation entre l’erreur de positionnement et l’erreur théorique de distance.

4 Conclusion et perspectives

Dans ce papier, nous avons étudié l’impact de la vitesse sur l’estimation des distances et positions des nœuds d’un réseau WBAN. Nous avons modélisé cet impact sur l’estimation des distances avec le protocole 3-WR. Puis, nous avons quantifié cet impact en utilisant un modèle de mobilité réaliste. Les résultats montrent que l’erreur de d’estimation de distance est faible par rapport aux distances parcourues, et présente une variation corrélée à celle de la vitesse des nœuds. Nous comptons étendre cette analyse à d’autres scénarios.



(a)



(b)

FIGURE 5 – (a) Erreur sur l’estimation de distances entre l’ancre A4 et les nœuds. (b) Erreur sur l’estimation des positions en fonction du temps de simulation.

Références

- [1] S. Ullah, M. Mohaisen et M. A. Alnuem. *A Review of IEEE 802.15.6 MAC, PHY, and Security Specifications*. International Journal of Distributed Sensor Networks, pp. 1-12, 2013.
- [2] Z. Xiao, Y. Hei, Q. Yu et K. Yi. *A survey on impulse-radio UWB localization*. Sci. China Inf. Sci. vol. 53, pp. 1322-1335, Jul. 2010.
- [3] H. Soganci, S. Gezici et H. Poor. *Accurate positioning in ultra-wideband systems*. IEEE Wireless Communications. vol. 18, no.2, pp.19-27, April 2011
- [4] A. Guizar, A. Ouni, C. Goursaud, N. Amiot et J. Gorce. *Impact of MAC scheduling on positioning accuracy for motion capture with UWB body area networks*. Proceedings of the 9th International Conference on Body Area Networks, Oct. 2014.
- [5] G.Chelius, A. Fraboulet et E. Ben Hamida. <http://ws-net.gforge.inria.fr/>. 2012
- [6] Vicon. <http://www.vicon.com/>