

ӨОЖ 004.421.4/519.16

Ғ.Н. Еркебай*, Л.М. Мусабеева, Ж.Д. Изтаев, П.А. Кожабеева

магистрант, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
т.ғ.д., профессор, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
п.ғ.к., доцент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
т.ғ.к., доцент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: ganierkebai@mail.ru

ҚҰРЫЛЫС КОМПАНИЯЛАРЫНА IMU НЕГІЗІНДЕ ҒИМАРАТТАРДЫҢ ІШІН ЛОКАЛИЗАЦИЯЛАУ ҮШІН АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР АЛГОРИТМІН ӘЗІРЛЕУ

Түйін

Құрылыс алаңдарындағы ресурстарды локализациялау және қадағалау-бұл өнімділікті бағалау, жобаның барысын бағалау және/немесе құрылыс алаңындағы қауіпсіздікті жақсарту үшін материалдардың, жұмыс күшінің және жабдықтың орналасуын пайдаланатын дамып келе жатқан сала. GPS сыртқы құрылыс жұмыстарын бақылау үшін кеңінен қолданылады. Алайда, GPS сигналдың жеткіліксіз қамтылуына байланысты, әсіресе туннельдерде немесе ғимараттарда қолдануға жарамсыз. Ғимараттар ішіндегі локализация бойынша бірнеше зерттеулер жүргізілді, бірақ мұндай әзірлемелер көбінесе сыртқы коммуникациялық желілердің кең инфрақұрылымына байланысты. Бұл әзірлемелер шулы құрылыс алаңдарында электромагниттік кедергілерге де бейім. Бұл мақалада Инерциялық өлшеу блогында жабдықталған микроконтроллерді қолдана отырып, ғимарат ішіндегі оқшаулау жүйесі ұсынылған. Инерциялық өлшеу блогында құрамында датчиктер жиынтығы бар: акселерометр, гироскоп және магнитометр. Микроконтроллер сенсорлық деректер мен тоғыз дәрежелі еркіндік қозғалыс теңдеулерін қолдана отырып, гравитациялық емес үдеуді есептеу үшін тікелей косинус матрицасының алгоритмін қолданады. Ағымдағы орын өлшенген үдеу және курс мәндері негізінде есептеледі, бұл жылдамдықты интеграциялау алгоритмін қолдана отырып, жылдамдықты бағалаудағы қатенің жоғарылауын ескереді. Эксперименттердің нәтижелері кез-келген сыртқы құралдар мен көріну жағдайларына тәуелсіз жұмыс істей алатын дамыған жүйенің салыстырмалы тиімділігін көрсетеді.

Кілттік сөздер: ғимарат ішіндегі локализация, құрылыс компаниялары, IMU, технология алгоритмі, серпінді интеграция.

Кіріспе. Ғимарат ішіндегі локализация саласындағы зерттеулердің бүгінгі күнге дейін өте белсенді зерттеу саласы болып табылатындығы әлі де көптеген мәселелерді шешуге болатындығын көрсетеді. Мәселелер қолдану аясына байланысты талап етілетін дәлдік пен сенімділікке байланысты. Сенсорлық технологияның соңғы жетістіктері ресурстардың қозғалысын анықтау, орналастыру және бақылау үшін көптеген технологияларды енгізуге мүмкіндік берді. Нәтижесінде ресурстар мен активтерді қадағалау, Жер жұмыстары, геодезия, қауіпсіздік қатерлерін болжау және контекстті ескере отырып құрылыс бойынша көптеген зерттеу жұмыстары жасалды [1-10].

Соңғы бірнеше жылда бірнеше зерттеушілер үш негізгі категорияға бөлуге болатын ғимарат ішіндегі орналасу технологияларымен тәжірибе жасады: (1) толқындардың таралуы; (2) кескінге негізделген навигация; және (3) инерциялық навигация. Толқындардың таралу технологиялары радио, ультрадыбыстық немесе дыбыстық толқындардың қашықтыққа таралуының физикалық қасиеттеріне негізделген [11-16]. Радиожиілікті (RF) оқшаулау технологияларының мысалдары ультра кең жолақты, инфрақызыл, сымсыз және RFID болып табылады. Дегенмен, зерттеушілер бұл технологияларды пайдаланудың кейбір шектеулері туралы хабарлады. Инфрақызыл технология бөлме деңгейінде дәлдікті қамтамасыз етеді және күн сәулесінде жақсы жұмыс істемейді [16]. WLAN технологиясының локализациясының дәлдігін әртүрлі зерттеушілер зерттеді және ол қолданылған локализация алгоритміне және

WLAN кіру нүктелерінің санына байланысты 4-9 м аралығында өзгертіні белгілі болды [17-19]. Зерттеушілер RFID сигналдарын оқшаулау жүйелерінің әртүрлі дәлдігі туралы хабарлады – белгілердің конфигурациясына және белгілердің орналасу тығыздығына байланысты 5 - тен 9 метрге дейін [20-22]. Ультра кең жолақты жүйелер өте жоғары дәлдікке ие-шамамен 20 см [23], Бірақ сатылымдағы ультра кең жолақты локализация жүйелерінің құны өте жоғары. Ультрадыбыстық технология дыбыс толқындарының таралуына негізделген. Ультрадыбыстық жүйенің мәлімделген дәлдігі 9 см [23], Бірақ таратқыштарды орнату үшін тікелей көріну қажет және құнын ультра кең жолақты таратқыштармен салыстыруға болады [16].

Кескінге негізделген локализация технологиясы кескінді сәйкестендіруді және компьютерлік көру әдістерін қамтиды. Компьютерлік көру әдістері (1) шекараны анықтау және нысанды тану сияқты жаһандық әдістерге және (2) көрнекі белгілер немесе кескінді сәйкестендіру арқылы бағдарларды анықтауға негізделген жергілікті әдістерге бөлінеді [24]. Алайда, бұл әдістер жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді (бөлме деңгейінде) және қоршаған ортаның бітелуіне және өзгеруіне бейім.

Инерциялық навигациялық локализация технологиясы қозғалысты анықтау үшін акселерометр мен гироскопты пайдаланады. Акселерометр үш өлшемді кеңістіктегі үдеуді өлшейді. Офсет үдеуді екі рет біріктіру арқылы есептеледі. Курсты есептеу үшін гироскоп акселерометрмен бірге қолданылады. Бұл принцип дәл санау әдісі деп аталады [25]. Нақты есептеу пайдаланушының соңғы белгілі позициядан қаншалықты алыс және қай бағытта қозғалғанын анықтау үшін белгілі бір уақыт аралығында үдеу мен қозғалыс бағытын біріктіруге негізделген. WLAN және RFID-тен айырмашылығы, қозғалысты анықтау технологиясы ешқандай инфрақұрылымға тәуелді емес [26]. Алайда, акселерометрлер кездейсоқ қозғалыстардан туындаған үдеуге сезімтал, олар міндетті түрде адамның қозғалысы болмауы мүмкін, ал магнитометрлер электр жабдықтары мен электроника тудыратын магнит өрістеріне сезімтал [26]. Жалпы алғанда, қозғалысты анықтау орналасудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етпейді, бірақ дәлдікті дрейф қателерін түзетуге қабілетті ақылды алгоритмдер арқылы жақсартуға болады [27].

Бірнеше зерттеушілер құрылыста инерциялық навигацияны қолдануға тырысады, Джошуа [28] жұмысшылардың өнімділігін бағалау үшін қалау жұмыстарын жіктеу үшін акселерометрлерді қолданды. Танежа [29] жергілікті желілерді (WLAN) және радиожилікті сәйкестендіруді (RFID) құру үшін пайдаланылған басқа датчиктермен салыстырғанда құрылыс алаңындағы орынды бақылау үшін инерциялық өлшеу блоктарының (IMU) датчиктерін зерттеді.

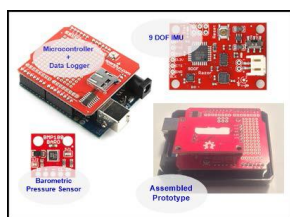
Теориялық талдау. Әртүрлі технологияларды қолдана отырып, бірнеше ішкі оқшаулау жүйелерін дамыту бойынша айтарлықтай зерттеу жұмыстары жүргізілгенімен, бұл жүйелердің өнімділігі әлі де жоғары және құрылыс алаңдары сияқты тығыз және шулы ішкі ортада пайдалану үшін жеткілікті сенімді емес. Автоматтандырылған жұмыс барысы туралы есеп беру және құрылыс алаңындағы қауіпсіздік сияқты күрделі құрылыс тапсырмаларын қолдау үшін үй ішінде сенімді, үнемді және дәл оқшаулау шешімдерін әзірлеу үшін қосымша зерттеулер қажет.

Бұл мақалада инерциялық өлшеу блогымен (IMU) жабдықталған микроконтроллерді қолдана отырып, ішкі оқшаулау жүйесіне арналған инерциялық навигация әдісіне жаңадан жасалған қосымша ұсынылған. Бұл қосымша серпілістерді біріктіру алгоритмін қолдана отырып, үдеу мен курсты өлшеу кезінде жинақталған қателіктерді азайтуға арналған.

Тәжірибелік бөлім. Әзірленген әдіс прототиптік аппараттық құралдар мен бағдарламалық жасақтама алгоритмдерін қамтиды. Аппараттық құралдарды әзірлеу сурет 1-де көрсетілгендей инерциялық өлшеу блогымен (IMU) және атмосфералық қысым сенсорымен жабдықталған микроконтроллерден тұрады.

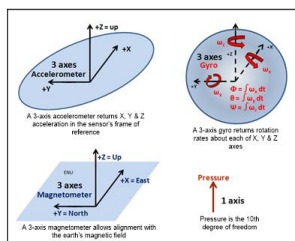
IMU үш сенсорды қамтиды - itg-3200 (MEMS үш координатты гироскоп), ADXL345 (үш координатты акселерометр) және HMC5883L (үш координатты магнитометр), олар инерцияны 9 градуста өлшеуге мүмкіндік береді. Атмосфералық қысым сенсоры жүйе үшін оныншы

еркіндік дәрежесін қамтамасыз етеді.



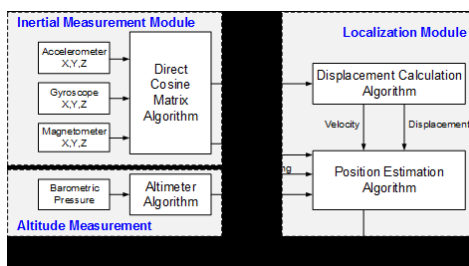
Сурет 1. Әзірленген аппараттық прототип

Барлық сенсорлардың шығысы кіріктірілген atmega328 процессорымен өңделеді және сериялық интерфейс арқылы шығарылады. Бұл аппараттық конфигурация 2-суретте көрсетілгендей үш өлшемді кеңістіктегі ағымдағы орынды есептеу үшін 10 еркіндік дәрежесін береді.



Сурет 2. Бостандықты 10 градусқа өлшеу жүйесі

Бағдарламалық жасақтаманы әзірлеу үш модульден тұрады, атап айтқанда инерциялық өлшеу модулі, биіктікті өлшеу модулі және 3-суретте көрсетілгендей локализация модулі. Инерциялық өлшеу модулі бағытты косинус матрицасының (DCM) алгоритмін қолдана отырып, инерциялық датчиктерді өңдейді және қосады. Бұл алгоритм акселерометр векторы (ауырлық күші) және магнитометр векторы (компас) көмегімен гироскоптың орын ауыстыруын түзетуді қарастырады, сонымен қатар X және Y магниттік компоненттерінің көлбеуін өтейді және иілу бұрышы бойынша магниттік бағытты түзетуді қамтамасыз етеді. Биіктікті өлшеу модулі ағымдағы ауа-райын (ылғалдылық, температура) ескере отырып, өлшенген атмосфералық қысым негізінде биіктікті есептейді... және т. б.).



Сурет 3. Әзірленген әдіс

Локализация модулі деректерді жинау модулінен алынған үдеу, курс және атмосфералық қысым деректері негізінде ағымдағы орынды есептейді. Сызықтық қозғалыс сызықты есептеу үшін өлшенген үдеуді саралау арқылы қозғалысты есептеу алгоритмін қолдана отырып есептеледі, содан кейін жылдамдық пен қашықтықты есептеу үшін осы сызықты үш рет біріктіреді. Дифференциация акселерометр көрсеткіштеріндегі тұрақты ток қорының

қателіктерін түзетуге мүмкіндік береді және нөлдік жылдамдық интервалдарын анықтауға мүмкіндік береді. Орналасу алгоритмі Калман сүзгісін қолдана отырып, есептелген қозғалыстар, бағыт және биіктік негізінде ағымдағы орынды есептейді. Бұл алгоритмдердің математикалық негіздемесімен егжей-тегжейлі сипаттамасы келесі бөлімдерде берілген.

Қозғалысты есептеу алгоритмі

Дәстүр бойынша ,мещысу үдеуді екі рет біріктіру арқылы есептеледі, бірақ үдеу сигналындағы тұрақты токтың сысуымен байланысты дрейфке байланысты жаһандықмещысу қатесі уақыт өте келе артады. Бұл қателерді азайту үшін бұл зерттеу үдеудің өзгеру жылдамдығын (серпіліс) есептеу үшін алдымен үдеу дифференциалданатын үштік интеграция әдісін ұсынады. Серпіліс сонымен қатар ауырлық күшінің әсерінен үдеу компоненттерін жоюға мүмкіндік береді.

Итеруді уақыт бойынша үдеу жылдамдығының өзгеруі ретінде анықтауға болады [30], ал халықаралық өлшем бірлігі-м/с³. Ньютонның екінші қозғалыс Заңына сәйкес, итеру уақыт бірлігіне масса бірлігіне әсер ететін күш шамасының өзгеруі ретінде қарастырылады. Соңғы жылдары jerk жаһандық позициялау жүйесін (GPS) бақылау және орналастыру, жоғары жылдамдықты динамикалық Көлік құралдарын бақылау, жоғары жылдамдықты Машиналарды автоматты басқару және жоғары жылдамдықты пойыздар мен лифттердің жайлылығын бағалау үшін қолданылады [31-33]. Уақыттың ауысуынан серпіліс пен интегралдың да маңызы зор екені анық.

Серпіліс мәнін уақыт бойынша үдеу туындысын анықтау арқылы есептеуге болады.

$$\text{Прорыв} = \frac{d(\text{ускорение})}{dt} \quad (1)$$

Содан кейін серпіліс үдеу, жылдамдық және қозғалу үшін сандық интеграция әдісін қолдана отырып үш рет біріктіріледі. Сияқты кейбір дәстүрлі интеграция әдістері ньумарк әдісі және Уилсон-θ әдісі, әдетте, сейсмотехникада итерулерді біріктіру үшін қолданылады, алайда бұл әдістер үдеу тұрақты немесе уақыт аралығында сызықтық түрде өзгереді деп болжайды [34, 35], бұл интервалды итеруге әкеледі 0 немесе тұрақтыға тең болу және бұл болжам нақты жағдайға сәйкес келмейді. Айнымалы үдеуді есепке алу және әдеттегі интеграцияға қарағанда аз қателіктер алу үшін бұл зерттеуде трапеция тәрізді интеграция әдісі қолданылады.

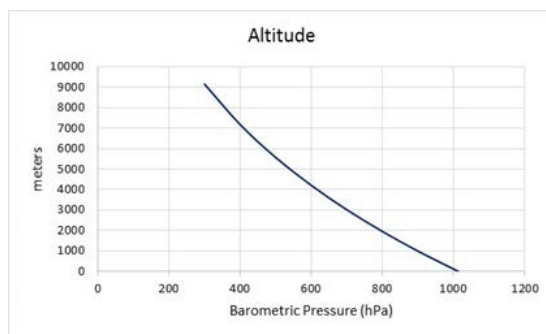
$$\text{Ускорение} = \frac{(\text{Прорыв}_{t-1} - \text{Прорыв}_t)}{2} \cdot dt \quad (2)$$

Этажды бағалау

Атмосфералық қысым биіктіктің жоғарылауымен төмендейтіні белгілі. Көптеген зерттеушілер 4-суретте көрсетілгендей атмосфералық қысым мен биіктік арасындағы типтік байланысты анықтау үшін модельдер жасады. Осы модельдерге сәйкес атмосфералық қысым әр 1 м биіктік үшін шамамен 0,11 мПа-ға төмендейді.

Өлшенген р қысымы мен теңіз деңгейіндегі P₀ қысымы кезінде, мысалы, 1013,25мПа, метрдегі биіктікті халықаралық барометрлік формула бойынша есептеуге болады:

$$\text{Высота} = 44330 \cdot \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right) \quad (3)$$



Сурет 4. Биіктіктің атмосфералық қысымға тәуелділігі

Теңіз деңгейіндегі анықтамалық қысым станцияның биіктігіне байланысты нақты уақыт режимінде атмосфералық қысымы туралы онлайн есеп беретін метеостанциялар үшін есептеледі.

Барометрлік қысым датчигі арқылы биіктікті анықтау процесі қарапайым болып көрінгенімен, басқа аспектілерді де ескеру қажет. Атмосфералық қысым датчиктері, әдетте, температурасы 15°C және қысымы 1013,2 мПа болатын құрғақ ауа сияқты стандартты атмосфералық жағдайлар үшін калибрленеді. Әр түрлі ауа-райы жағдайлары үшін түзету коэффициентін ескеру қажет.

Сонымен қатар, ауа қысымының өзгеруінің кешігуі сенсордың көрсеткіштерінде айтарлықтай қателікке әкелуі мүмкін, бірақ бөлмеде оқшауланған жағдайда бұл факторды елемуге болады. Біздің тестілеуіміз көрсеткендей, еденді ауыстыру кезінде ауа қысымының өзгеруі шамамен 0,42 мПа құрайды, бұл сенсор шығаратын шу деңгейінен едәуір жоғары (bmp180 қысым сенсоры үшін 0,02 мПа).

Орналасу алгоритмі

Орналасу алгоритмі дискретті деректерді сызықтық сүзу мәселесін шешу үшін алғаш рет 1960 жылы енгізілген Калман сүзгісін пайдалануға негізделген [36]. Содан бері ауқымды зерттеулер жүргізілді және оны қолдану ұсынылды, әсіресе робототехника және навигация саласында. Калман сүзгісінің басты артықшылығы-оның қарапайым есептеу алгоритмі және адаптивті-рекурсивті сипаты [37]. Калман сүзгісін бағалау процесі кері байланысты басқару жүйесіне негізделген. Ол алдымен процестің күйін белгілі бір уақытта бағалайды, содан кейін өлшеу нәтижелерін алады. Бұл кері байланыс өлшемі келесі бағалау үшін модель параметрлерін реттеу үшін қолданылады. Модель T уақыт моментіндегі жүйенің күйі теңдеуге сәйкес $t - 1$ уақыт моментіндегі алдыңғы күймен салыстырғанда өзгергенін болжайды.

$$X_t = A_t \cdot X_{t-1} + B_t u_{t-1} + w_t \quad (4)$$

мұндағы X_t - t уақытындағы процесс күйінің векторы, A_t -алдыңғы X_{t-1} күйіне қолданылатын күй ауысу матрицасы, u_t -басқару кірісінің векторы, u_t басқару векторына қолданылатын ВТ-басқару кірісінің моделі және W_t -көп өлшемді қалыпты үлестіруден шығарылатын процестің шуы нөлдік орташа мәнмен және Q_t ковариациясымен.

t уақыт нүктесінде X_t шынайы күйінің z_t өлшемі келесіге сәйкес есептеледі:

$$Z_t = H_t X_t + v_t \quad (5)$$

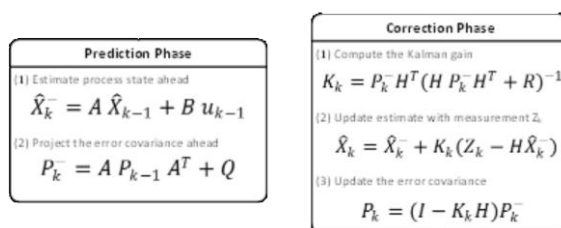
Мұндағы H_t -шынайы күй кеңістігін өлшем кеңістігіне бейнелейтін өлшеу моделі, ал v_t - R_t ковариациясы бар нөлдік орташа Гаусс ақ шуына тең деп есептелетін өлшеу шуы.

Сурет 5-те көрсетілген Калман сүзгісінің рекурсивті бағалау моделі екі фазадан тұрады:

келесі бақылау сәтіндегі процестің априорлық күйін бағалайтын болжау фазасы және жақсартылған постериорлық бағалауды алу үшін априорлық бағалауға жаңа өлшемді қамтитын түзету фазасы.

Осы мақалада сипатталған позициялау алгоритмі контекстінде x күй векторы-орналасу, жылдамдық және үдеу деректері бар вектор

$$X = [x \cdot y \cdot z \cdot v_x \cdot v_y \cdot v_z \cdot a_x \cdot a_y \cdot a_z]^T \quad (6)$$



Сурет. 5. Калман сүзгісін рекурсивті бағалау моделі

Процесс уақыттың бастапқы сәтіндегі күй векторын сәйкес, оңтайлы бағалаудан басталады. Координаттар мәндерге тең (0, 0, 0), ал жылдамдықтар, үдеулер мен серпіліс нөлге тең болады. Бұл оңтайлы күйдің бастапқы векторының ауытқуы диагональды деп болжауға болады және сәйкес мәндерді қабылдауға болады.

Осыдан кейін әр қадамда келесі процесс қайталанады:

1. Алдыңғы дәуірдегі күй векторының оңтайлы бағасына негізделген (болжамды) күй векторының бағасын және онымен байланысты ауытқу матрицасын есептеңіз.
2. Болжалды күй векторын және IMU жылдамдығы мен үдеуін өлшеуді біріктіру арқылы бақылау теңдеулерінен.
3. Ең кіші квадраттар әдісі бойынша күй векторының бағасын және сәйкес дисперсия матрицасын есептеңіз.

Эксперимент және нәтижелер

Әзірленген әдістің тиімділігін тексеру үшін әртүрлі локализация сценарийлері үшін бірнеше эксперименттер жүргізілді. Әзірленген прототип ерікті адамға белдік қысқышымен бекітілді. Прототип деректерді өңдеді және персоналдың орналасқан жері туралы ақпаратты дерекқор қосымшасына сымсыз жіберді, ол өз кезегінде уақыт белгілері бар деректерді сақтап қалды.

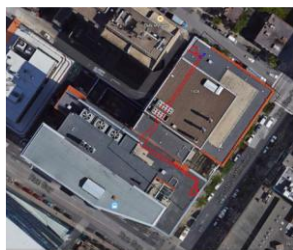
Эксперимент параметрлері кесте 1-де келтірілген. Бұл эксперименттер 5-тен 260 метрге дейінгі қашықтыққа арналған әртүрлі траекторияларды қолданды. Әзірленген әдістің дұрыстығын тексеру үшін әртүрлі жүру үлгілері қолданылды - баяу, жылдамнан жүтіруге дейін.

Кесте 1 - Эксперименттердің сипаттамасы

Сынақ	Сипаттамасы	Ұзақтығы	Қашықтық
1	Баяу түзу сызық	7 секунд	5 метр
2	Жылдам түзу сызық	24 секунд	25 метр
3	Түзу сызықпен жүтіру	72 секунд	120 метр
4	Кампуста серуендеу	294 секунд	260 метр

«Кампуста серуендеу» экспериментінде жол бір жерде басталып, аяқталды. Жол түзу сызықпен жүрді және бірнеше солға және оңға бұрылды. Сондай-ақ, маршрут 6-суретте көрсетілгендей атмосфералық қысым датчигі сигналы арқылы биіктікті өлшеу дәлдігін

тексеру үшін бірнеше баспалдақпен көтерілуді және түсуді қамтыды.

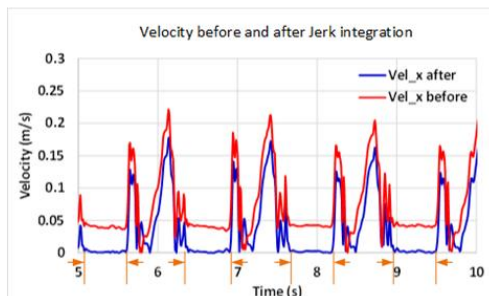


Сурет 6. Кампус жаяу жүргіншілер жолы

Құжаттың шектеулі көлеміне байланысты ол барлық эксперименттердің нәтижелерінің қысқаша мазмұнымен соңғы эксперименттің нәтижелерін ғана егжей-тегжейлі сипаттайды. Нәтижелерді дұрыс бағалау үшін әрбір эксперимент отыз рет қайталанды. Барлығы 120 деректер жиынтығы жиналды, эксперименттің жалпы ұзақтығы 396 минутты құрады.

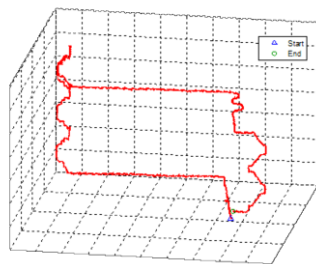
Серпіліс арқылы интеграцияланғанға дейінгі X осі бойынша жылдамдық есептелген жылдамдықтан ауытқуды көрсетеді, мұндай ауытқу есептелген жерде қателіктердің пайда болу себептерінің бірі болып табылады (сурет 7). Серпіліс интеграторы жылдамдықтың тұрақтымешісуын жойды, сондықтан орынды бағалаудағы қателерді азайтты.

Серпілісті есепке алу арқылы үдеуді есептеу кезінде қателерді азайту өлшенген үдеу мәндеріндегі гравитациялық компонентті жоюдың тиімді әдісін және ұзақ жүгірістерде үлкен дрейф қатесіне әкелетін бағдарлау қателерін қамтамасыз етеді. IMU бағдарлауындағы қате үдеу сигналдарының жаһандық осьтерге дұрыс емес проекциясына әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде үдеуді біріктірудің дұрыс емес бағытына әкеледі.



Сурет 7. Серпіліс арқылы интеграцияға дейінгі және кейінгі жылдамдық

Сурет 8-де жобаланған әдісті қолдана отырып, есептелген жаяу жүргіншілер жолының үш өлшемді кестесін көрсетеді. Нәтижелер болжамды орналасу 2D-де 3,67 м қателікпен жоспарланған маршрутқа өте дәл сәйкес келетінін көрсетеді, жолдың басы мен соңы арасында 260,79 М.демек, орналасу қатесі жалпы жүріп өткен қашықтықтың шамамен 1,40% құрайды.



Сурет 8. Есептелген үш өлшемді қозғалыс траекториясы

Нәтижелер мен талқылау. Барлық эксперименттер үшін дрейфтің орташа қателігі (жолдың жалпы ұзындығының пайызымен) №1 эксперимент үшін 0,32% - дан №4 эксперимент үшін 1,40% - ға дейін өзгерді (орташа 30 жүгіру). Бұл қателіктер дайын IMU локализация жүйесін қолданған алдыңғы зерттеулермен [29] салыстырылды. Олардың эксперименттік нәтижелері ұзындығы 250 м-ге дейінгі қозғалыс траекториялары үшін 1,92% - дан 6,2% - ға дейінгі дрейф қателіктерінің диапазонын көрсетті.

Қорытындылар. Бұл мақалада IMU көмегімен ішкі оқшаулаудың инерциялық әдісін кеңейту ұсынылған. Өзірленген әдіс прототиптік аппараттық құралдар мен бағдарламалық жасақтама алгоритмдерін қамтыды. Аппараттық әзірлеу инерциялық өлшеу блогымен (IMU) және атмосфералық қысым сенсорымен жабдықталған микроконтроллерден тұрады. Бұл аппараттық конфигурация үш өлшемді кеңістіктегі ағымдағы орынды бағалау үшін 10 еркіндік дәрежесін береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Caldas, C.H., Torrent, D.G., & Haas, C.T. Using global positioning system to improve materials-locating processes on industrial projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006, 132(7), 741-749. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(741)
2. Ergen, E., Akinci, B., & Sacks, R. Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS. *Automation in Construction*, 2007, 16(3), 354-367. doi:10.1016/j.autcon.2006.07.004.
3. Goodrum, P.M., McLaren, M.A., & Durfee, A. The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites. *Automation in Construction*, 2006, 15(3), 292-302. doi:10.1016/j.autcon.2005.06.004
4. Torrent, D.G., & Caldas, C.H. Methodology for automating the identification and localization of construction components on industrial projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(1), 3-13. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:1(3)
5. Jang, W., & Skibniewski, M. J. A wireless network system for automated tracking of construction materials on project sites. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2008, 14(1), 11-19. doi:10.3846/1392-3730.2008.14.11-19
6. Khoury, H.M., & Kamat, V.R. High-precision identification of contextual information in location-aware engineering applications. *Advanced Engineering Informatics*, 2009, 23(4), 483-496. doi:10.1016/j.aei.2009.04.002
7. Razavi, S.N., & Haas, C.T. Multisensor data fusion for on-site materials tracking in construction. *Automation in Construction*, 2010, 19(8), 1037-1046. doi:10.1016/j.autcon.2010.07.017
8. Razavi, S.N., Young, D.A., Nasir, H., Haas, C., Caldas, C., Goodrum, P., & Murray, P. Field trial of automated material tracking in construction. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2008 - "Partnership for Innovation"*, June 10, 2008 - June 13, , 3 1503-1511.
9. Song, J., Haas, C.T., Caldas, C., Ergen, E., & Akinci, B. Automating the task of tracking the delivery and receipt of fabricated pipe spools in industrial projects. *Automation in Construction*, 2006, 15(2), 166-177. doi:10.1016/j.autcon.2005.03.001

10. Teizer, J., Venugopal, M., & Walia, A. Ultrawideband for automated real-time three-dimensional location sensing for workforce, equipment, and material positioning and tracking. *Transportation Research Record*, 2008, 2081, 56-64. doi:10.3141/2081-06
11. Finkenzeller, K. (2003). *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*, Wiley, West Sussex, UK
12. Guerrieri, J.R., Francis, M. H., Wilson, P.F., Kos, T., Miller, L.E., Bryner, N.P. Klein-Berndt, L. RFID-assisted indoor localization and communication for first responders. *European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006*, November 6, 2006 - November 10, , P. 626.
13. Want, R., Hopper, A., Falcao, V., & Gibbons, J. Active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, 1992, 10(1), 91-102. doi:10.1145/128756.128759
14. Skibniewski, M. J., & Jang, W. Localization technique for automated tracking of construction materials utilizing combined RF and ultrasound sensor interfaces. *2007 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, July 24, 2007 - July 27, 657-664. doi:10.1061/40937(261)78
15. Kim, B., & Choi, J. Active beacon system with the fast processing architecture for indoor localization. *12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2007*, September 25, 2007 - September 28, 892-895. doi:10.1109/EFTA.2007.4416875
16. Hightower, J., & Borriello, G. Location systems for ubiquitous computing. *Computer*, 2001, 34(8), 57-66. doi:10.1109/2.940014
17. Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. *19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies - IEEE INFOCOM2000: 'Reaching the Promised Land of Communications'*, March 26, 2000 - March 30, , 2 775-784.
18. Elnahrawy, E., Li, X., & Martin, R. P. The limits of localization using signal strength: A comparative study. *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004, 406-14.
19. Deasy, T.P., & Scanlon, W.G. Stepwise algorithms for improving the accuracy of both deterministic and probabilistic methods in WLAN-based indoor user localisation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2004, 11(4), 207-16. doi:10.1007/s10776-004-1234-1
20. Hightower, Jeffrey, Roy Want, and Gaetano Borriello. (2000). SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. *UW CSE 00-02-02*, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA 1
21. Ni, L. M., Liu, Y., Yiu, C. L., & Patil, A.P. (2003). LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003)*, 407-15.
22. Pradhan, A., Ergen, E., & Akinici, B. (2009). Technological assessment of radio frequency identification technology for indoor localization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(4), 230-8. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:4(230)
23. Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C (Applications and Reviews)*, 2007, 37(6), 1067-80. doi:10.1109/TSMCC.2007.905750
24. Sim, R., & Dudek, G. Comparing image-based localization methods. *18th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 2003*, August 9, 2003 - August 15, 1560-1562.
25. Randell, C., Djiallis, C., & Muller, H. Personal position measurement using dead reckoning. *7th IEEE International Symposium on Wearable Computers, ISWC 2003*, October 21, 2003 - October 23, 166-175.
26. Gelb, Arthur. (1974). *Applied optimal estimation*. MIT press.
27. Glanzer, G., Bernoulli, T., Wiessflecker, T., & Walder, U. Semi-autonomous indoor positioning using MEMS-based inertial measurement units and building information. *2009 6th Workshop on*

- Positioning, Navigation and Communication (WPNC'09), 2009, 135-9. doi:10.1109/WPNC.2009.4907816
28. Joshua, L., & Varghese, K. Accelerometer-based activity recognition in construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2011, 25(5), 370-9. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000097
29. Taneja, S., Akcamete, A., Akinci, B., Garrett, J. H., J., Soibelman, L., & East, E. W. Analysis of three indoor localization technologies for supporting operations and maintenance field tasks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2012, 26(6), 708-19. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000177
30. Schot, S.H. Jerk: The time rate of change of acceleration. *American Journal of Physics*, 1978, 46(11), 1090-4. doi:10.1119/1.11504
31. Aoki, T., Shimogaki, Y., Ikki, T., Tanikawara, M., Sugimoto, S., Kubo, Y., & Fujimoto, K. Cycle slip detection in kinematic GPS with a jerk model for land vehicles. *International Journal of Innovative Computing, Information & Control*, 2009, 5(1), 153-66.
32. Liu, C., Gazis, D.C., & Kennedy, T.W. Human judgment and analytical derivation of ride quality. *Transportation Science*, 1999, 33(3), 290-7. doi:10.1287/trsc.33.3.290
33. Hrovat, D., & Hubbard, M. A comparison between jerk optimal and acceleration optimal vibration isolation. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 112(2), 201-10. doi:10.1016/S0022-460X(87)80189-X
34. R.W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw- Hill, New York, NY, USA, 1993.
35. A.K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, New Delhi, India, 2007.
36. Kalman, Rudolph Emil. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Fluids Engineering* 1960, 82.1, 35-45.
37. Anderson, Brian DO, and John B. Moore. (2012). *Optimal filtering*. Courier Corporation

References

1. Caldas, C.H., Torrent, D.G., & Haas, C.T. Using global positioning system to improve materials-locating processes on industrial projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006, 132(7), 741-749. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(741)
2. Ergen, E., Akinci, B., & Sacks, R. Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS. *Automation in Construction*, 2007, 16(3), 354-367. doi:10.1016/j.autcon.2006.07.004.
3. Goodrum, P.M., McLaren, M.A., & Durfee, A. The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites. *Automation in Construction*, 2006, 15(3), 292-302. doi:10.1016/j.autcon.2005.06.004
4. Torrent, D.G., & Caldas, C.H. Methodology for automating the identification and localization of construction components on industrial projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(1), 3-13. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:1(3)
5. Jang, W., & Skibniewski, M. J. A wireless network system for automated tracking of construction materials on project sites. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2008, 14(1), 11-19. doi:10.3846/1392-3730.2008.14.11-19
6. Khoury, H.M., & Kamat, V.R. High-precision identification of contextual information in location-aware engineering applications. *Advanced Engineering Informatics*, 2009, 23(4), 483-496. doi:10.1016/j.aei.2009.04.002
7. Razavi, S.N., & Haas, C.T. Multisensor data fusion for on-site materials tracking in construction. *Automation in Construction*, 2010, 19(8), 1037-1046. doi:10.1016/j.autcon.2010.07.017
8. Razavi, S.N., Young, D.A., Nasir, H., Haas, C., Caldas, C., Goodrum, P., & Murray, P. Field trial of automated material tracking in construction. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2008 - "Partnership for Innovation"*, June 10, 2008 - June 13, , 3 1503-1511.

9. Song, J., Haas, C.T., Caldas, C., Ergen, E., & Akinci, B. Automating the task of tracking the delivery and receipt of fabricated pipe spools in industrial projects. *Automation in Construction*, 2006, 15(2), 166-177. doi:10.1016/j.autcon.2005.03.001
10. Teizer, J., Venugopal, M., & Walia, A. Ultrawideband for automated real-time three-dimensional location sensing for workforce, equipment, and material positioning and tracking. *Transportation Research Record*, 2008, 2081, 56-64. doi:10.3141/2081-06
11. Finkenzeller, K. (2003). *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*, Wiley, West Sussex, UK
12. Guerrieri, J.R., Francis, M. H., Wilson, P.F., Kos, T., Miller, L.E., Bryner, N.P. Klein-Berndt, L. RFID-assisted indoor localization and communication for first responders. *European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006*, November 6, 2006 - November 10, , P. 626.
13. Want, R., Hopper, A., Falcao, V., & Gibbons, J. Active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems*, 1992, 10(1), 91-102. doi:10.1145/128756.128759
14. Skibniewski, M. J., & Jang, W. Localization technique for automated tracking of construction materials utilizing combined RF and ultrasound sensor interfaces. *2007 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, July 24, 2007 - July 27, 657-664. doi:10.1061/40937(261)78
15. Kim, B., & Choi, J. Active beacon system with the fast processing architecture for indoor localization. *12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2007*, September 25, 2007 - September 28, 892-895. doi:10.1109/ETFA.2007.4416875
16. Hightower, J., & Borriello, G. Location systems for ubiquitous computing. *Computer*, 2001, 34(8), 57-66. doi:10.1109/2.940014
17. Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. *19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies - IEEE INFOCOM2000: 'Reaching the Promised Land of Communications'*, March 26, 2000 - March 30, , 2 775-784.
18. Elnahrawy, E., Li, X., & Martin, R. P. The limits of localization using signal strength: A comparative study. *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004, 406-14.
19. Deasy, T.P., & Scanlon, W.G. Stepwise algorithms for improving the accuracy of both deterministic and probabilistic methods in WLAN-based indoor user localisation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2004, 11(4), 207-16. doi:10.1007/s10776-004-1234-1
20. Hightower, Jeffrey, Roy Want, and Gaetano Borriello. (2000). *SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength*. UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA 1
21. Ni, L. M., Liu, Y., Yiu, C. L., & Patil, A.P. (2003). LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003)*, 407-15.
22. Pradhan, A., Ergen, E., & Akinci, B. (2009). Technological assessment of radio frequency identification technology for indoor localization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(4), 230-8. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:4(230)
23. Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C (Applications and Reviews)*, 2007, 37(6), 1067-80. doi:10.1109/TSMCC.2007.905750
24. Sim, R., & Dudek, G. Comparing image-based localization methods. *18th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 2003*, August 9, 2003 - August 15, 1560-1562.
25. Randell, C., Djalllis, C., & Muller, H. Personal position measurement using dead reckoning. *7th IEEE International Symposium on Wearable Computers, ISWC 2003*, October 21, 2003 - October 23, 166-175.

26. Gelb, Arthur. (1974). Applied optimal estimation. MIT press.
27. Glanzer, G., Bernoulli, T., Wiessflecker, T., & Walder, U. Semi-autonomous indoor positioning using MEMS-based inertial measurement units and building information. 2009 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'09), 2009, 135-9. doi:10.1109/WPNC.2009.4907816
28. Joshua, L., & Varghese, K. Accelerometer-based activity recognition in construction. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(5), 370-9. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000097
29. Taneja, S., Akcamete, A., Akinci, B., Garrett, J. H., J., Soibelman, L., & East, E. W. Analysis of three indoor localization technologies for supporting operations and maintenance field tasks. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 26(6), 708-19. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000177
30. Schot, S.H. Jerk: The time rate of change of acceleration. American Journal of Physics, 1978, 46(11), 1090-4. doi:10.1119/1.11504
31. Aoki, T., Shimogaki, Y., Ikki, T., Tanikawara, M., Sugimoto, S., Kubo, Y., & Fujimoto, K. Cycle slip detection in kinematic GPS with a jerk model for land vehicles. International Journal of Innovative Computing, Information & Control, 2009, 5(1), 153-66.
32. Liu, C., Gazis, D.C., & Kennedy, T.W. Human judgment and analytical derivation of ride quality. Transportation Science, 1999, 33(3), 290-7. doi:10.1287/trsc.33.3.290
33. Hrovat, D., & Hubbard, M. A comparison between jerk optimal and acceleration optimal vibration isolation. Journal of Sound and Vibration, 1987, 112(2), 201-10. doi:10.1016/S0022-460X(87)80189-X
34. R.W. Clough and J. Penzien, Dynamics of Structures, McGraw- Hill, NewYork, NY,USA, 1993.
35. A.K. Chopra, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall, New Delhi, India, 2007.
36. Kalman, Rudolph Emil. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of Fluids Engineering 1960, 82.1, 35-45.
37. Anderson, Brian DO, and John B. Moore. (2012). Optimal filtering. Courier Corporation

Г.Н. Еркебай*, Л.М. Мусабекова, Ж.Д. Изтаев, П.А. Кожабекова

магистрант, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
д.т.н., профессор, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
к.п.н., доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
к.т.н., доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: ganierkebai@mail.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПАНИЙ НА ОСНОВЕ IMU ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВНУТРИ ЗДАНИЙ

Аннотация

Локализация и отслеживание ресурсов на строительных площадках-это развивающаяся отрасль, в которой используется расположение материалов, рабочей силы и оборудования для оценки производительности, оценки прогресса проекта и/или повышения безопасности на строительной площадке. GPS широко используется для мониторинга наружных строительных работ. Однако GPS не подходит для использования из-за недостаточного покрытия сигнала, особенно в туннелях или зданиях. Было проведено несколько исследований по локализации внутри зданий, но такие разработки во многом обусловлены обширной инфраструктурой внешних коммуникационных сетей. Эти разработки также подвержены электромагнитным помехам на шумных строительных площадках. В этой статье представлена система изоляции внутри здания с использованием микроконтроллера, оснащенного инерционным измерительным блоком (IMU). IMU содержит набор датчиков: акселерометр, гироскоп и магнитометр. Микроконтроллер использует алгоритм прямой косинусной матрицы для вычисления негравитационного ускорения с использованием сенсорных данных и уравнений движения с девятью

степенями свободы. Текущее местоположение рассчитывается на основе измеренных значений ускорения и курса, что учитывает увеличение погрешности в оценке скорости с использованием алгоритма интеграции скорости. Результаты экспериментов показывают относительную эффективность развитой системы, способной работать независимо от любых внешних средств и условий видимости.

Ключевые слова: локализация внутри здания, строительные компании, IMU, алгоритм технологии, прорывная интеграция.

G.N. Yerkebay*, L.M. Musabekova, Zh.D. Iztaev, P.A. Kozhabekova

Master's student, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Dr.Tech.Sci., Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Cand.Ped.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Cand.Tech.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

*Corresponding author's email: ganierkebai@mail.ru

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION TECHNOLOGY ALGORITHM FOR THE INTERNAL LOCALIZATION OF IMU BUILDINGS IN NEGIZIN FOR A CONSTRUCTION COMPANY

Abstract

Localization and tracking of resources at construction sites is an emerging industry where the location of materials, labor, and equipment is used to assess performance, assess project progress, and/or improve safety at the construction site. GPS is widely used to monitor outdoor construction work. However, GPS is not suitable for use, especially within tunnels or buildings, due to insufficient signal coverage. Several studies have been conducted on localization within buildings, but such developments are largely due to the extensive infrastructure of external communication networks. These developments are also subject to electromagnetic interference on noisy construction sites. This article presents an in-building insulation system using a microcontroller equipped with an inertial measurement unit (IMU). The IMU contains a set of sensors: accelerometer, gyroscope and magnetometer. The microcontroller uses a direct cosine Matrix algorithm to combine sensor data and calculate non-gravitational acceleration using the equations of motion of nine degrees of freedom. The current position is calculated based on the measured acceleration and course values, which take into account the increase in the error in the speed assessment using the speed integration algorithm. The results of the experiments show the relative efficiency of the developed system, which can work independently of any external means and visibility conditions.

Keywords: localization inside the building, construction companies, IMU, technology algorithm, breakthrough integration.